ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Под редакцией И. П. Копылова

Для студентов вузов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Под редакцией И. П. КОПЫЛОВА

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электрические машины»



МОСКВА ЭНЕРГИЯ 1980

ББК 31.261
П 79
УДК 621.313.001.2(075.8)

Рецензенты: кафедра электрических машин ЛЭТИ, В. И. Радин

Авторы: И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев

Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов/И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов,
П79 Б. К. Клоков и др.; Под ред. И. П. Копылова. — М.: Энергия, 1980.— 496 с., ил.

В пер.: 2 р.

В книге рассматриваются вопросы проектирования электрических машин общепромышленного применения. Излагаются электромагнитные, тепловые, вентиляционные и механические расчеты асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока, а также вопросы их конструирования. Изложенные методы поясняются примерами расчета электрических машин. Приведены необходимые для практических расчетов вспомогательные материалы и частные программы расчетов на вычислительных машинах.

Книга является учебным пособием для студентов электротехнических факультетов энергетических и политехнических вузов, выполняющих курсовые проекты по электрическим машинам. Она может быть также использована инженерами, проектирующими электрические машины.

П $\frac{30307\text{-}383}{051(01)\text{-}80}$ 114-80. 2302030000 ББК 31.261
6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга является учебным пособием по курсу «Проектирование электрических машин» при выполнении курсовых и дипломных проектов по электрическим машинам для студентов энергетических вузов и электротехнических факультетов политехнических вузов.

В книге рассматриваются асинхронные, синхронные и коллекторные машины постоянного тока общепромышленного применения. Индивидуальные машины проектируются на базе единых серий электрических машин. Хотя книга и имеет учебное назначение, она может использоваться инженерами-электромеханиками в практической работе.

При работе над книгой авторы использовали достижения электротехнической промышленности по сериям 4А, 2П и новым сериям синхронных двигателей. В книге нет материалов по специальным электрическим машинам и турбо- и гидрогенераторам.

Предполагается, что курсовой проект может быть выполнен с использованием логарифмической линейки или мини-ЭВМ. По каждому типу машин приведены программы, позволяющие использовать вычислительные машины для решения частных задач проектирования.

Данная книга написана сотрудниками кафедры электрических машин МЭИ и призвана осуществить преемственность с книгой П. С. Сергеева, Н. В. Виноградова, Ф. А. Горяинова «Проектирование электрических машин», выдержавшей три издания.

Работа над книгой была распределена между авторами следующим образом: проф. И. П. Копыловым написаны введение, гл. 1 и 2; доц. Б. К. Клоковым — гл. 4 и 6, § 1-3, 1-4, 1-7, 3-1—3-10 и приложение; доц. В. П. Морозкиным — гл. 8 и § 3-11—3-13; проф. Б. Ф. Токаревым — гл. 7 и 9; проф. Ф. А. Горяинов является автором гл. 5, которая мало изменена по сравнению с написанными им ранее аналогичными разделами книги [28].

Авторы благодарят коллектив кафедры «Электрические машины» ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина) и докт. техн. наук, проф. В. И. Радина за ценные замечания, которые учтены при работе над рукописью, а также коллектив кафедры электрических машин МЭИ и редактора Ю. С. Маринина за большую помощь при подготовке издания.

Авторы с благодарностью примут все замечания читателей и просят сообщить их по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая промышленность — ведущая отрасль народного хозяйства СССР. Объем продукции отрасли превышает 10 млрд. руб. в год, в ней занято около миллиона человек. Продукция электротехнической промышленности используется почти во всех промышленных установках, поэтому качество электротехнических изделий во многом определяет качество продукции других отраслей промышленности.

Электрические машины в общем объеме производства электротехнической промышленности занимают основное место, поэтому эксплуатационные свойства новых электрических машин имеют важное значение для экономики нашей страны.

Проектирование электрических машин — это искусство, соединяющее знание процессов электромеханического преобразования энергии с опытом, накопленным поколениями инженеров-электромехаников, умением применять вычислительную технику и талантом инженера, создающего новую или улучшающего уже выпускаемую машину.

При проектировании электрической машины рассчитываются размеры статора и ротора, выбираются типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины должны быть так сконструированы и рассчитаны, чтобы при изготовлении машины трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала наилучшими энергетическими показателями. При этом электрическая машина должна соответствовать условиям применения ее в электроприводе.

При проектировании необходимо учитывать соответствие технико-экономических показателей машин современному мировому уровню. Проектирование электрических машин производится с учетом требований государственных и отраслевых стандартов. При проектировании электрических машин приходится учитывать назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надежность в работе и патентную чистоту. Проектирование электрических машин (их расчет и конструирование) неотделимы от технологии их изготовления. Поэтому при проектировании необходимо учитывать возможности электротехнических заводов, стремиться к максимальному снижению трудоемкости.

Значительное увеличение выпуска электрических машин происходит при некотором сокращении численности рабочих. Это возможно только при внедрении комплексной автоматизации и механизации процессов изготовления машин. В некоторых случаях оказывается целесообразным для повышения надежности в работе и возможности автоматизации процессов изготовления машин пойти на увеличение размеров шлица и снижение коэффициента заполнения пазов.

В настоящее время редко проектируется индивидуальная машина, а проектируются и выпускаются серии электрических машин. На базе серий выполняются различные модификации машин, что накладывает определенные требования на выполнение проекта новой электрической машины.

Электрические машины единых серий в СССР выпускаются в огромных количествах. Только асинхронных двигателей единых серий на 1980 г. намечено выпустить около 10 млн. Серии электрических машин выпускаются в течение 7—12 лет. Проектирование новых серий — ответственная, выходящая за рамки одной отрасли проблема. Оно осуществляется в рамках Интерэлектро с учетом мировых достижений ведущих электротехнических фирм. Это накладывает особые требования на проектирование базовых машин серии и их модификаций. При проектировании необходимо учитывать возможные изменения стоимости материалов и электроэнергии, спрос на международном рынке, затраты на технологическое оборудование и другие факторы.

Выбор оптимального варианта определяется критерием, который определяется минимумом суммарных затрат, т.е минимумом стоимости материалов, затрат на изготовление и эксплуатацию. Стоимость эксплуатации зависит от КПД, коэффициента мощности, качества машины, ремонтоспособности и ряда других факторов.

Выбрать оптимальный вариант можно, сопоставляя многие варианты расчета. Поэтому без вычислительных машин не обходится ни один серьезный расчет электрических машин. Вначале вычислительные машины применялись для расчетов частных задач, расчета отдельных этапов проекта (магнитной цепи, потерь, рабочих характеристик, теплового расчета, вибраций и т.п.). В последние годы ЭВМ применяются для выполнения полного расчета электрической машины и ведутся работы по созданию системы автоматического проектирования электрических машин, которая должна не только выполнять расчет машины, но и выдавать рабочие чертежи. Предполагается, что в будущем автоматизированные системы проектирования будут выполнять работу от приема заказа на проектирование до испытания машины без ее изготовления — прогнозирования геометрии, надежности и характеристик [20].

Составление программ расчетов, накопление банка программ, решение вопросов создания автоматизированной системы проектирования электрических машин — одна из трудных и важных задач электротехнической науки. Прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться проектировать машину. Для этого надо уметь проводить электромагнитный, тепловой, механический и экономический расчеты машины.

Данное учебное пособие должно научить рассчитывать электрическую машину, применяя традиционные средства вычислительной техники — мини-ЭВМ и логарифмическую линейку. Однако в книге по каждому типу машин имеются примеры расчета и частные программы расчета на ЭВМ, которые могут облегчить однотипные расчеты.

Учебное пособие не может содержать все данные, необходимые для расчета и конструирования электрической машины, поэтому предполагается, что читатель при выполнении проекта будет пользоваться справочниками, электротехническими журналами, каталогами и атласами чертежей.

Глава первая

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1-1. ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Впервые электрические машины получили применение в промышленности более ста лет назад. Тогда же появились и первые рекомендации по их расчету. К концу прошлого века в Западной Европе и Америке возникли крупные электротехнические фирмы «Сименс», «Вестингауз» и другие, на которых сложились крупные конструкторские и расчетные отделы. В это же время начали издаваться первые электротехнические журналы.

Первые электротехнические заводы в России появились в начале века. Это «Электросила» в Ленинграде, «Динамо» в Москве и заводы в Харькове и Таллине. Уже в годы первых пятилеток Москва, Ленинград, Харьков превратились в крупные научные и производственные центры электропромышленности. После Великой Отечественной войны электротехническая промышленность развивалась бурными темпами, и сегодня крупные центры электромашиностроения имеются в десятках городов СССР. Около пятидесяти кафедр высших учебных заведений страны выпускают специалистов по электрическим машинам.

Первые капитальные работы по расчетам и проектированию электрических машин появились в конце десятых, начале двадцатых годов. Это были книги Э. Арнольда, М. Видмара, А. Ла-Кура, Р. Рихтера, К. И. Шенфера, В. С. Кулебакина и других.

Первыми советскими трудами по проектированию были книги П. П. Копняева, А. Я. Бергера и В. А. Пантелеева, Ф. И. Холуянова. Большой вклад в проектирование электрических машин внесли работы советских ученых А. Е. Алексеева, Б. П. Апарова, А. И. Вольдека, В. Т. Касьянова, М. П. Костенко, Б. И. Кузнецова, Р. А. Лютера, Г. Н. Петрова, И. М. Постникова, П. С. Сергеева, Т. Г. Сорокера, В. А. Трапезникова и других.

Проектирование электрической машины — сложная многовариантная задача. При ее решении приходится учитывать большое количество факторов. Естественным стремлением всех, кто проектирует машину, является получение, по возможности наиболее быстрым путем, более близкого к заданию расчетного варианта. Поэтому методики, подход к расчету и проектированию электрических машин на всех этапах развития включали в себя все новейшие достижения в теории и практике электромашиностроения.

Большинство расчетных методик исходит из «машинной постоянной», определяемой из допустимых электромагнитных нагрузок.

Машинная постоянная Арнольда

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta}, \quad (1\text{-}1)$$

где D — диаметр якоря машин постоянного тока или внутренний диаметр статора, м;

l_δ — расчетная длина воздушного зазора, м;

Ω — частота вращения, об/мин;

P' — расчетная мощность, Вт;

A — линейная нагрузка, А/м;

B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл;

α_δ, k_B, $k_{об}$—коэффициенты (см. ниже).

Определив $C_A=f(P')$ для различных типов электрических машин, далее можно получить базу для их расчетов. Машинная постоянная не является постоянной и зависит от электромагнитных нагрузок, напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, надежности работы машины, суммы капитальных и эксплуатационных затрат и других факторов.

Эссон в двадцатых годах предложил при проектировании применять коэффициент использования машины — момент на единицу объема, по существу величину, обратную постоянной Арнольда.

Машинная постоянная Рихтера есть момент, отнесенный к единице поверхности якоря. В машинной постоянной К. И. Шенфера вместо внутреннего диаметра статора используется внешний диаметр.

В 1926 г. В. С. Кулебакин при выборе главных размеров синхронных машин учитывал токи короткого замыкания. В 1934 г. Б. П. Апаров для синхронных машин предложил при выборе главных размеров исходить из необходимой кратности пускового и максимального моментов.

Г. Н. Петров в [25] вводит понятие единичной машины и касательной силы, действующей на единицу поверхности ротора. Касательная сила зависит от мощности машины, но даже у самых крупных машин не превосходит 0,03—0,04 МПа.

Авторы книг по проектированию электрических машин, критикуя машинные постоянные, уточняли их, вводили новые, но и сегодня нет единого подхода к выбору основных размеров машины.

Масса является одним из основных факторов, характеризующих технический уровень электрических машин. По сравнению с 1913 г. масса асинхронных двигателей современных серий снижена в 3 раза (рис. 1-1). Наиболее значительное снижение массы было достигнуто в 1920—1950 гг. Предполагается, что в 1980—1990 гг. сокращение массы может составить не более 4—5%. В дальнейшем будет еще труднее обеспечить снижение массы при практически неизменном уровне

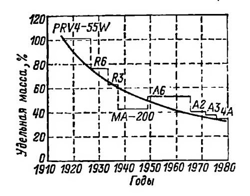


Рис. 1-1. Масса асинхронных двигателей различных серий.

энергетических показателей электрической машины. Даже небольшой процент сокращения расхода активных материалов потребует серьезных работ по усовершенствованию технических свойств изоляционных и магнитных материалов. Эти условия необходимы, так как выпуск асинхронных машин единой серии в СССР увеличился с 1940 г. в 10 раз.

Удельный расход материалов в турбогенераторах с 1952 г. снизился более чем в 3 раза. Турбогенератор 150 тыс. кВт с водородным охлаждением весил 350 т. Турбогенератор ТВВ-1200-2 имеет массу на единицу мощности, равную 0,457 кг/(кВ·А).

Как следует из (1-1), размеры машины зависят от индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A.

При рассмотрении электрической машины как объекта разработки необходимо учитывать объем и длительность проектных, расчетных и технологических работ. Предпроизводственные работы включают изготовление рабочих чертежей, технологической оснастки и изготовление опытных образцов.

Предпроизводственный этап требует достаточно много времени и в нем участвуют большие коллекти-

вы конструкторов и технологов. Качество разработки проекта определяет судьбу электрической машины в производстве и эксплуатации.

Электрическая машина как объект производства должна иметь минимальную трудоемкость и минимальные капитальные вложения в производство. Для этого она должна иметь технологичную конструкцию, максимально использовать существующее технологическое оборудование и оснастку.

Важнейшим требованием является минимальная материалоемкость. Экономия электротехнической стали, меди, алюминия, изоляции и конструкционных материалов является важнейшим требованием при создании новой электрической машины. С экономией материалов связано создание машин, имеющих минимальные отходы материалов при изготовлении. Электрические машины с безотходной технологией изготовления имеют преимущества перед обычными машинами, если сохраняются требования к машине как к объекту эксплуатации.

Как объект эксплуатации электрическая машина должна иметь высокие показатели (КПД и $\cos\varphi$). Электрические машины с минимальными потерями позволяют уменьшить вложение материалов в энергосистему. Высокие энергетические показатели электрической машины гарантируют снижение уровня текущих затрат на эксплуатацию и капитальные вложения потребителя.

Показатели экономической эффективности электрической машины могут быть установлены на основании анализа приведенных затрат, которые включают затраты на изготовление и эксплуатацию машины.

1-2. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Цифровые электронные вычислительные машины (ЭВМ) впервые начали использоваться для расчетов электрических машин в начале 50-х годов в США и СССР. Во ВНИИЭМ Т. Г. Сорокером и Б. М. Каганом ЭВМ были применены для расчетов серий электрических машин. За последние годы вычислительные машины получили настолько широкое применение, что сегодня ни один расчет, ни одно научное исследование в электромеханике не обходятся без применения вычислительных машин.

Существуют две основные тенденции в применении ЭВМ при проектировании электрических машин. В большинстве работ вычислительная техника применяется для расчетов отдельных частей или всей электрической машины по существующим методикам. Вторая связана с созданием нового подхода к расчету, когда в основе расчета лежат дифференциальные уравнения, описывающие процессы электромеханического преобразования энергии.

Первый путь дает ускорение вычислений, обеспечивает перебор многих вариантов. Однако полуэмпирические формулы, положенные в основу расчета, снижают эффективность применения вычислительных машин. Второй путь позволяет более строго подойти к оптимизации, решать более сложные задачи, но он еще недостаточно разработан. Необходимо развивать оба направления, стремиться к оптимизации электрической машины, работающей в электромеханической системе при изменении напряжений, частоты, окружающих условий, с учетом работы элементов системы и динамических процессов [20].

В настоящее время при проектировании электрических машин применяются как цифровые ЭВМ, так и аналоговые вычислительные машины АВМ [18, 19].

При решении задач динамики предпочтительно применять АВМ, они просты в обслуживании и имеют удобные выводные устройства. Недостатками АВМ являются ограниченный объем решаемой задачи и малая универсальность.

Цифровые ЭВМ универсальны, объем решаемой задачи может быть

значительно большим, чем на АВМ, точность определяется принятым расчетным методом. Вследствие технической сложности и универсальности ЭВМ сосредоточиваются на вычислительных центрах. Чтобы избежать трудоемкого программирования и связанной с этим длительной отладки программы, необходимо стремиться к созданию универсальных программ. Цифровые ЭВМ широко применяются при расчете магнитной системы, характеристик машин, механических, тепловых и вентиляционных расчетов.

Внедрение ЭВМ для автоматизации инженерных расчетов привело к существенному повышению технико-экономических показателей электрических машин, обеспечило качественный сдвиг в решении задач оптимального проектирования.

Анализ приведенных затрат применительно к асинхронным двигателям единой серии до 10 кВт показал, что примерно 70% затрат составляют текущие расходы на их эксплуатацию. На долю капиталовложений приходится лишь 15—20% всех затрат. Следовательно, повышение эффективности новых электрических машин прежде всего связано со снижением эксплуатационных расходов. Первоочередное значение здесь имеют повышение надежности в работе машин и улучшение их энергетических показателей. При этом повышение КПД экономически более выгодно, чем повышение $\cos\varphi$.

Повышение надежности и улучшение КПД должны достигаться без заметного увеличения затрат на изготовление электрической машины. Сокращение расходов на электротехническую сталь и обмоточные провода может дать существенное уменьшение себестоимости электрической машины.

Хотя основная заработная плата и составляет 5—8% себестоимости, снижение трудоемкости механических и обмоточно-изолировочных работ имеет важное значение. В связи с увеличением выпуска электрических машин и недостатком рабочей силы снижение трудоемкости настолько важно, что в серии 4А пошли на некоторое снижение энергетических показателей, увеличивая размеры шлица пазов для возможности машинной намотки обмотки.

Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования. Оптимальное проектирование электрических машин может представляться как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений. Сложность алгоритма расчета затрудняет задачу оптимизации. Несмотря на широкое применение вычислительных машин, оптимальные варианты машины иногда выбираются на основании опыта и интуиции проектировщика.

Выбор критерия оптимальности зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для специальных машин целесообразно выбирать минимум массы или минимальные габариты. Для электрической машины общего назначения в качестве критерия оптимизации принимают минимум приведенных затрат. Этот критерий широко применяется в СССР и за рубежом. Приведенные затраты на электрическую машину в процессе производства и эксплуатации являются обобщающим экономическим показателем, включающим основные экономические эквиваленты основных технических характеристик.

Нельзя найти универсальный критерий оптимальности. Действительно, минимальная масса машины обусловливает снижение энергетических показателей и ухудшение надежности. Наиболее очевидны противоречия между статическими и динамическими характеристиками. Для уменьшения времени разбега асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление обмотки ротора. Повышенное сопротивление ротора вызывает ухудшение энергетических показа-

телей. Когда электрическая машина работает при неизменном напряжении, приложенном к ее выводам и не зависящем от нагрузки (сеть бесконечной мощности), задачу оптимизации машины следует проводить по минимуму суммарных затрат.

Задача оптимального проектирования электрической машины или серии машин может быть представлена как общая задача нелинейного математического программирования, которая сводится к нахождению минимума или максимума критерия оптимальности при наличии определенного числа независимых переменных проектирования и функций лимитеров, представляющих собой технические или технологические требования-ограничения к проекту.

В настоящее время назрела необходимость решения задачи комплексной автоматизации проектирования электрических машин. Этой цели служит система автоматизированного проектирования электрических машин (САПРЭМ) [19, 20].

САПРЭМ — это сложный комплекс, позволяющий производить как расчетные, так и проектно-конструкторские работы. САПРЭМ разбивается на ряд подсистем, каждая из которых решает определенные задачи синтеза на основе сложившихся принципов проектирования с взаимодействием «человек — ЭВМ». САПРЭМ включает систему алгоритмов и создание на их основе пакетов прикладных программ. В первую очередь создается САПР асинхронных машин, которая должна обеспечить автоматизацию расчетных и графических работ. При этом машина представляется состоящей из стандартных узлов и деталей, которые конструируются в режиме «человек — ЭВМ».

Широкая автоматизация проектных работ изменит в ближайшие годы процесс проектирования электрических машин, произойдут значительные изменения и в учебном проектировании. Однако данное учебное пособие рассчитано на применение частных программ и мини-ЭВМ, так как пока не накоплен опыт автоматического проектирования электрических машин.

1-3. ПОДХОД К РАСЧЕТУ ОТДЕЛЬНОЙ МАШИНЫ И СЕРИИ МАШИН

Преобразование энергии в электрических машинах происходит в воздушном зазоре, где концентрируется основная часть энергии магнитного поля.

Объем активной части, т. е. пространство, в котором размещены магнитные сердечники и пазовые части обмоток, определяется произведением $D_a^2 l$, где D_a — наружный диаметр статора в машинах переменного тока или диаметр станины в машинах постоянного тока, а l — длина сердечника. Наружный диаметр D_a зависит от конструктивного и технологического выполнения машины и не является определяющим в электромагнитном расчете. При анализе размерных соотношений рассматривают внутренний диаметр статора D в асинхронных и синхронных машинах или диаметр якоря в машинах постоянного тока и расчетную длину воздушного зазора l_δ.

В обычных электрических машинах $D_a \sim D$, а l_δ мало отличается от l и произведение $D^2 l_\delta$ пропорционально объему активной части машины.

Размеры D и l_δ называют главными размерами машины.

Расчетная мощность машины

$$P' = mIE. \qquad (1\text{-}2)$$

В (1-2) для синхронных и асинхронных машин I и E — соответственно номинальный ток и ЭДС обмотки статора, а для машин постоянного тока — номинальный ток и ЭДС обмотки якоря; m — число фаз машины (для машин постоянного тока $m = 1$).

Отношение $P'/D^2 l_\delta$ определяет удельную мощность машины, т. е. мощность на единицу объема ее активной части. Эта величина характеризует степень использования объема активной части машины и является важной характеристикой

для сравнения машин, имеющих одну и ту же частоту вращения.

Более общим критерием является отношение момента, развиваемого машиной, к объему ее активной части, которое называют коэффициентом использования

$$k_и = \frac{P'/\Omega}{D^2 l_\delta}. \qquad (1\text{-}3)$$

В этом выражении Ω — угловая частота ротора.

Эффективность использования объема активной части машины определяется электромагнитными нагрузками: линейной нагрузкой A и индукцией в воздушном зазоре B_δ. Линейная нагрузка определяется отношением тока всех витков обмотки к длине окружности. Ее значение показывает, какой ток приходится в среднем на единицу длины окружности зазора машины. Индукция в воздушном зазоре при данных диаметре по зазору и числе полюсов определяет поток машины и, следовательно, уровень индукции в участках магнитопровода.

Чем больше A и B_δ, тем больше коэффициент использования объема активной части

$$k_и \approx AB_\delta.$$

Эта зависимость и выражена в машинной постоянной C_A. Выражение (1-1) показывает, что при постоянных A и B_δ расчетная мощность изменяется пропорционально объему активной части машины.

Эта зависимость значительно более сложная, и машинная постоянная в реальных машинах не постоянна при различных мощности и размерах машин. При увеличении объема активной части удается выполнить машины с бо́льшими A и B_δ, что в основном объясняется улучшением условий охлаждения машин в связи с увеличением их габаритов. Поэтому C_A с увеличением мощности машин уменьшается, а коэффициент использования возрастает.

Наибольшие допустимые уровни электромагнитных нагрузок для конкретных машин определяются допустимым нагревом активных частей, так как с ростом A и B_δ увеличиваются потери в единице активного объема машины. На основании опыта проектирования и эксплуатации электрических машин выработаны определенные диапазоны возможных значений A и B_δ для различных типоразмеров машин, при которых нагрев их активных частей не превышает допускаемого для принятого класса изоляции обмоток. Значения электромагнитных нагрузок задаются в виде рекомендаций в соответствующих расчетных методиках и служат основой для правильного выбора объема активной части. С развитием теории и практики электромашиностроения коэффициент использования объема активной части машин повышается.

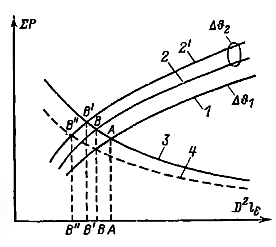


Рис. 1-2.

На рис. 1-2 показаны возможности уменьшения массы и габаритов для однотипных машин одной и той же мощности и частоты вращения, но выполненных с различным объемом активных частей. Там же представлены зависимости потерь от объема активной части машин. Выделяющиеся при работе потери уменьшаются с увеличением $D^2 l_\delta$ (кривая 3), так как в машинах одной и той же мощности, но с бо́льшими габаритами уменьшаются электромагнитные нагрузки A и B_δ и коэффициент использования. В то же время способность машины рассеивать потери с увеличением объема возрастает, так как при этом, во-первых, увеличивается поверхность охлаждения и, во-вторых, по-

является возможность лучшей организации охлаждающей системы. Кривая *1* показывает зависимость суммарных рассеиваемых потерь в машинах с различными D^2l_δ при определенном перепаде температуры поверхности машины и окружающей среды $\Delta\vartheta_1$. Если $\Delta\vartheta_1$ соответствует допустимому превышению температуры для принятого класса изоляции обмотки, то точка *A* пересечения кривых *1* и *3* соответствует объему, который необходимо выбрать при проектировании электрической машины данной мощности.

Применение изоляции более высокого класса нагревостойкости позволяет эксплуатировать машины с $\Delta\vartheta_2 > \Delta\vartheta_1$. При этом способность рассеивать потери возрастает (кривая *2*). Как видно, точка *B* ее пересечения с кривой *3* переместилась в сторону меньших значений D^2l_δ. Это свидетельствует о том, что переход на более нагревостойкую изоляцию дает возможность при той же мощности уменьшить габариты машины.

То же самое происходит, если в машине применена более совершенная система охлаждения — водородная, жидкостная, форсированные системы или внутреннее охлаждение. В этих случаях при том же превышении температуры $\Delta\vartheta_2$ способность рассеивать потери также возрастает (кривая *2'*) и объем активной части машины может быть уменьшен (точка *B'*). Однако при слишком больших нагрузках значительно снижаются КПД и $\cos\varphi$.

Использование новых сортов электротехнических сталей с лучшими магнитными свойствами и меньшими удельными потерями и новых электроизоляционных материалов, позволяющих уменьшить толщину изоляции и за счет этого снизить плотность тока в обмотках, приводит к общему уменьшению потерь (кривая *4*) и к уменьшению необходимого объема активной части (точка *B''*).

Поиски новых конструктивных решений, применение вычислительных машин, новых методов оптимизации, обобщение опыта проектирующих организаций позволяют создавать электрические машины с лучшими энергетическими характеристиками и меньшей массой.

За счет применения новых электроизоляционных и магнитных материалов, совершенствования методов расчета, конструкции и систем охлаждения машин удалось снизить удельную массу асинхронных двигателей от начала их широкого производства в 1910—1915 гг. до настоящего времени (см. рис. 1-1).

При проектировании новых машин и, в частности, при выполнении учебных проектов необходимо ориентироваться на современное конструктивное исполнение электрических машин, предусматривать применение новых электротехнических материалов.

Ориентируясь на рекомендованные в методиках значения электромагнитных нагрузок и используя выражение для машинной постоянной, можно достаточно точно найти объем активной части проектируемой машины D^2l_δ, при котором ее превышение температуры будет соответствовать допустимому. Однако этот объем может быть получен при различных сочетаниях значений D и l_δ. Аналитических зависимостей, однозначно определяющих эти величины для конкретных машин, не существует. В практике проектирования предварительно определяют диаметр D. Для этой цели обычно используют кривые, характеризующие среднюю зависимость $D=f(P/n)$ для большого числа построенных и эксплуатируемых машин данного типа. После этого с учетом выбранных электромагнитных нагрузок определяют l_δ, исходя из машинной постоянной.

Проверкой правильности выбора D является значение отношения l_δ/D или более часто принятое в практике отношение $\lambda=l_\delta/\tau$, где полюсное деление $\tau=\pi D/2p$. Число полюсов обычно известно или определяется из технического задания.

Значение λ характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие λ имеют машины относительно малого диаметра и

большой длины, и наоборот, малые значения λ — у коротких машин с большим диаметром. В первом случае машины имеют меньшую массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь обмотки, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше. Момент инерции машин с большими λ меньше, чем при малых λ, что особенно важно при проектировании двигателей, предназначенных для работы с частыми пусками.

Однако относительное увеличение длины машины при больших λ затрудняет условия их охлаждения, а в машинах постоянного тока приводит к ухудшению коммутации. В машинах небольших габаритов с увеличением λ возникают трудности с выполнением необходимого для нормальной работы числа пазов.

Анализ этих зависимостей и опыт эксплуатации позволили определить для различных типов машин диапазоны значений λ, при которых обеспечиваются их экономичность и хорошие эксплуатационные данные. Эти рекомендации служат критерием проверки правильности предварительного выбора D для проектируемой машины. Конкретные диапазоны возможных λ для различных типов машин приведены в соответствующих разделах книги.

В индивидуальном исполнении проектируются только машины для специальных применений. Обычно электрические машины выпускаются сериями. Серия — ряд машин возрастающей мощности, имеющих одну конструкцию и единую технологию производства на больших участках серии и предназначенных для массового производства. При проектировании серий машин важнейшее значение имеют вопросы унификации деталей, конструктивных узлов и нормализации ряда размеров. Все это связано с рациональной организацией производства как внутри завода, так и в объединении, выпускающем единую серию машин. При этом необходимо заботиться об экономической эффективности целой серии машин, а не одной машины.

При проектировании серий асинхронных машин выбирают внешние диаметры статора таким образом, чтобы при одном и том же внешнем диаметре получить несколько машин на различные мощности и частоты вращения при изменении длины машины. Для машин постоянного тока выбирают одинаковым диаметр якоря и, изменяя длину машины, проектируют несколько машин различной мощности и на разные частоты вращения.

Такое построение серий приводит к сокращению количества штампов, уменьшается количество моделей для отливки станин и подшипниковых щитов, сохраняются одни и те же диаметры валов, унифицируются подшипниковые щиты, сокращается количество оснастки и измерительного инструмента. Широкая унификация облегчает применение автоматических поточных линий, облегчает кооперацию между заводами.

Начиная с 1950 г. в СССР асинхронные двигатели выпускаются в виде единых серий. Первой была серия А-АО, заменившая серии И2, АД, «Урал» и др.

В настоящее время в СССР выпускается единая серия асинхронных двигателей 4А. В этой серии 17 габаритов число ступеней мощности составляет 33, диапазон мощностей 0,06—400 кВт, высоты осей вращения 50—355 мм. В 1975 г. начат выпуск серии машин постоянного тока 2П.

На базе единых серий выпускаются различные исполнения двигателей, предназначенных для работы в специальных условиях. Так, на базе серии 4А выпускаются электрические модификации: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, десятиполюсные и двенадцатиполюсные, многоскоростные, на частоту сети 60 Гц, однофазные, с фазным ротором и другие; специализированные по конструкции: встраиваемые, с встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, с встроенной температурной защитой, с повышенной точностью по установочным размерам, высокоточные, редуктор-

ные; специализированные по условиям окружающей среды: влагоморозостойкие, химостойкие, тропические; узкоспециализированные исполнения: для сельского хозяйства, для судов морского флота, для холодного климата, лифтовые, фреономаслостойкие, полиграфические и швейные.

Применение новых материалов и усовершенствование конструкции двигателей позволяет сэкономить в серии 4А по сравнению с двигателями А2: 24% стали электротехнической, 25% обмоточной меди, 20% чугунного литья, 10% алюминия, 30% стального проката. Масса двигателей снижается на 22%. От внедрения серии 4А общий экономический эффект составляет несколько десятков миллионов рублей в год.

При проектировании индивидуальной машины необходимо по возможности использовать имеющиеся на заводе штампы, модели, шаблоны и т. п. и так выбирать размеры, чтобы максимально использовать существующие узлы и детали.

1-4. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Конструктивные исполнения электрических машин, которые работают под водой, в космосе, под землей и в обычных условиях, многообразны. Почти все электрические машины имеют вращательное движение, причем обычно вращается одна часть машины — ротор, а статор неподвижен.

Независимо от рода питания (постоянного или переменного) электрические машины можно разделить на явно- и неявнополюсные.

К неявнополюсным машинам относятся асинхронные машины, и быстроходные синхронные машины (турбогенераторы и турбодвигатели).

Явно выраженные полюсы могут быть расположены либо на роторе (синхронные машины), либо на статоре (машины постоянного тока), хотя в специальных случаях машины постоянного тока могут быть с вращающимися обмотками возбуждения, а синхронные машины — с неподвижными. Такие машины принято называть обращенными. В книге рассматриваются электрические машины нормального исполнения общего назначения.

Условия, в которых работают электрические машины, классифицируются по ряду признаков (направление оси вала, чистота окружающего воздуха, его температура, влажность и т. п.), в зависимости от которых выпускают машины различных конструктивных исполнений.

При эксплуатации электрических машин возникает необходимость устанавливать их не только горизонтально, но и в вертикальном положении. В зависимости от способа крепления, направления оси вала и конструкции подшипниковых узлов конструктивные формы исполнения машин разделяют на девять конструктивных групп (СТ СЭВ 246-76), каждая из которых подразделяется на виды, содержащие в свою очередь по нескольку форм исполнения. Обозначение форм исполнения по способу монтажа содержит буквы IM и четыре цифры, первая из которых определяет группу (от 1 до 9), а остальные — способ монтажа и форму конца вала. В табл. 1-1 даны примеры обозначений форм исполнения электрических машин и их условные графические обозначения.

Структура условных обозначений конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа (по СТ СЭВ 246-76):

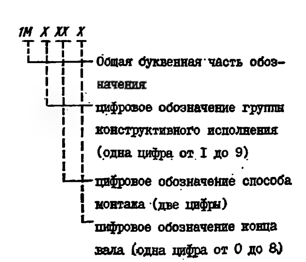
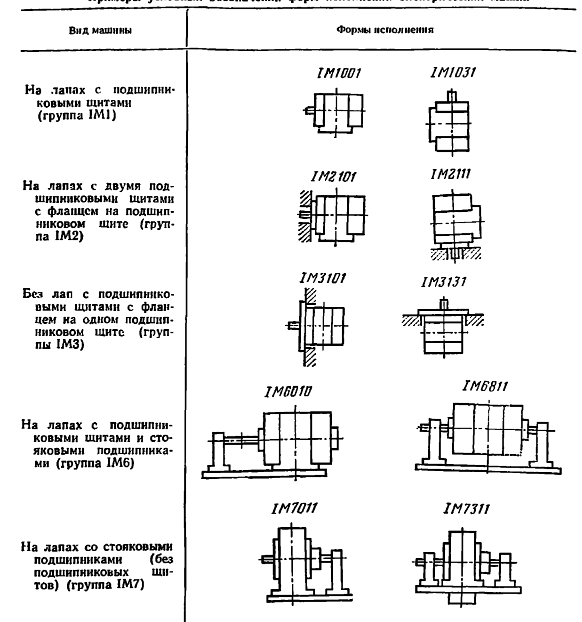


Таблица 1-1

Примеры условных обозначений форм исполнения электрических машин



Вид машины	Формы исполнения	
На лапах с подшипниковыми щитами (группа IM1)	IM1001	IM1031
На лапах с двумя подшипниковыми щитами с фланцем на подшипниковом щите (группа IM2)	IM2101	IM2111
Без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите (группы IM3)	IM3101	IM3131
На лапах с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками (группа IM6)	IM6010	IM6811
На лапах со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов) (группа IM7)	IM7011	IM7311

Группы конструктивных исполнений:

1 — машина на лапах с подшипниковыми щитами;

2 — машина на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите;

3 — машина без лап, с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном щите;

4 — машина без лап, с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;

5 — машина без подшипников;

6 — машина с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками;

7 — машина со стояковыми подшипниками (без щитов);

8 — машина с вертикальным валом (не охватываемая группами IM1 — IM4);

9 — машина специального исполнения.

Исполнения концов вала (концом вала называется его часть, выступающая за подшипник):

0 — без конца вала;

1 — с одним цилиндрическим;

2 — с двумя цилиндрическими;

3 — с одним коническим;

4 — с двумя коническими;

5 — с одним фланцевым;

6 — с двумя фланцевыми;

7 — с фланцевым со стороны привода и цилиндрическим на противоположной стороне;

8 — все прочие исполнения концов валов.

Примеры условного обозначения конструктивного исполнения и способа монтажа электрических машин:

IM1001 — машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и горизонтальным валом; конец вала — цилиндрический;

IM1011 — машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами с вертикальным валом, конец вала цилиндрический, направлен вниз;

IM1033 — машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами с вертикальным расположением вала, конец вала конический, направлен вверх;

IM2001 — машина на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите, доступным с обеих сторон, с горизонтальным расположением вала, конец вала цилиндрический;

IM3001 — машина без лап с подшипниковыми щитами с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обеих сторон, с горизонтальным расположением вала, конец вала цилиндрический;

IM6010 — машина с подшипниковыми щитами и стояковым подшипником на лапах, без конца вала;

IM6610 — машина с подшипниковыми щитами, с двумя стояковыми подшипниками, без конца вала;

IM7311 — машина со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов), на приподнятых лапах, с цилиндрическим концом вала.

Электрические машины эксплуатируются в различных климатических условиях, при различных влажности и температуре окружающего воздуха, различном давлении (различной высоте над уровнем моря), в атмосфере, содержащей те или иные коррозионно-активные элементы, и при других условиях, существенно отличающихся от нормальных. В нашей стране за нормальные условия принимают: температуру окружающей среды $+25\pm10°$ С, относительную влажность воздуха 35—80% и атмосферное давление 84—106 кПа. Чем более отличны условия, в которых эксплуатируется машина, от нормальных, тем значительнее отличается конструкция ее корпуса, обмоток, различных уплотнений и изоляции от принятых в машинах общего назначения. ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70 классифицируют макроклиматические районы и места установки машин в зависимости от факторов, влияющих на условия эксплуатации электрических машин, и определяют обозначения машин, предназначенных для работы в тех или иных условиях.

Климатические исполнения обозначаются одной или двумя буквами (табл. 1-2). Например, исполнение двигателей, предназначенных для эксплуатации на суше, реках или озерах в макроклиматических районах с умеренным климатом, обозначается буквой У. С холодным климатом — буквами ХЛ, с влажным тропическим климатом — ТВ. Во всех климатических районах на суше (общеклиматическое исполнение) — буквой О и т. д.

Категория размещения двигателей обозначается цифрой (от 1 до 5), следующей за буквенным обозначением климатического исполнения. Исполнение двигателей, которые могут эксплуатироваться на открытом воздухе, обозначается цифрой 1; в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от колебаний наружного воздуха, — цифрой 2; если двигатели рассчитаны на работу в закрытых помещениях, в которых колебания тем-

Таблица 1-2

Климатические исполнения двигателей

Исполнение двигателей	Обозначение
Двигатели, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах для макроклиматических районов:	
с умеренным климатом	У
с холодным климатом	ХЛ
с влажным тропическим климатом	ТВ
с сухим тропическим климатом	ТС
как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т
для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)	О
Двигатели, предназначенные для установки на морских судах для макроклиматических районов:	
с умеренно холодным морским климатом	М
с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне	ТМ
для неограниченного района плавания	ОМ
Двигатели, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

пературы и влажности, а также воздействие песка и пыли на машину существенно меньше, чем на открытом воздухе,— цифрой 3; в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых помещениях,— цифрой 4; в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды и происходит частая конденсация влаги на стенах и потолке, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, климатическое исполнение — 5.

Обозначение ХЛ1 означает, что машина может работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе. Двигатели общего назначения, к которым не предъявляют каких-либо дополнительных требований, имеют исполнение У3 или У4, т. е. они могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях категории 3 или 4.

Существуют исполнения по степени защиты от попадания внутрь машины посторонних предметов и от возможного соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими и вращающимися частями, находящимися внутри машины. Этот вид исполнения обычно называют исполнением по степени защиты. ГОСТ 14254-69 устанавливает буквенно-цифровое обозначение исполнений, состоящее из двух букв IP и двух цифр, первая из которых (от 0 до 6) характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины. Вторая цифра (от 0 до 8) характеризует степень защиты самой машины от проникновения в нее влаги. Таким образом, открытые машины, в конструкции которых не предусмотрено никаких мер для защиты, обозначаются IP00. Наиболее распространенными исполнениями машин по степени защиты являются IP22, IP23 и IP24. Первые два исполнения соответствуют защите от возможности соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины пальцев человека и твердых предметов диаметром более 12,5 мм (первая цифра 2 в обозначениях), а также защите от попадания в них капель воды. Исполнение IP22 предусматривает защиту от проникновения внутрь машины капель, падающих под углом не более 15° к вертикали, а исполнение IP23 — под углом, не превышающим 60° к вертикали. Машины исполнений IP22 и IP23 называют каплезащищенными (по старой терминологии).

Машины исполнения IP44 выполнены защищенными от возможности соприкосновения инструментов, проволоки или других подобных предметов, толщина которых не превышает 1 мм, с токоведущими частями, а также от попадания внутрь машины предметов диаметром более 1 мм (первая цифра 4).

Вторая цифра 4 обозначает, что машина защищена от попадания внутрь корпуса водяных брызг любого направления. Такие машины называют также закрытыми.

Для специальных целей выпускаются электрические машины с более высокой степенью защиты, например IP57. В этом исполнении машина защищена от попадания пыли внутрь корпуса и может работать будучи погруженной в воду.

Исполнение по способу охлаждения электрических машин определяет ту или иную систему вентиляции, расположение вентилятора и систему забора охлаждающего воздуха. Машины исполнения IP22 и IP23 обычно выполняют с самовентиляцией и продувом воздуха через машину, при этом вентилятор располагается на валу машины, а воздух, проходя внутри корпуса, охлаждает обмотки и сердечники. Машины исполнения IP44 в большинстве случаев имеют наружный обдув. Охлаждающий воздух при этой системе охлаждения прогоняется вдоль наружной поверхности оребренного корпуса с помощью вентилятора, установленного вне корпуса на выступающем конце вала и с противоположной стороны от его выходного конца. Более подробно системы вентиляции и исполнения машин по способам их охлаждения рассмотрены в гл. 5.

В последующих главах излагаются методы проектирования асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока общепромышленного применения. Все эти машины имеют много общего в конструкции обмоток, сердечников, валов, торцевых щитов, подшипниковых узлов и корпусов. Однако различия в требованиях, предъявляемых при эксплуатации, не позволяют создать полностью идентичных конструкций для всех типов электрических машин, так же как и методов их расчета и проектирования. Каждый из типов машин (асинхронные, синхронные и машины постоянного тока) имеет свои, присущие данному типу, особенности конструкции.

Асинхронные двигатели выпускаются двух типов: с роторами, имеющими фазную обмотку, и с короткозамкнутыми роторами. Более распространены двигатели с короткозамкнутыми роторами, так как отсутствие изоляции обмотки роторов и скользящих контактов делает их наиболее дешевыми в производстве и надежными в эксплуатации. Основным недостатком асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором является отсутствие надежного и экономичного способа плавного регулирования частоты вращения.

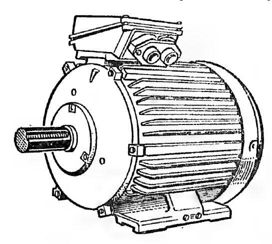


Рис. 1-3. Асинхронный двигатель серии 4А с короткозамкнутым ротором, $h=160$ мм, $2p=4$, $U_п=220/380$ В, закрытого обдуваемого исполнения 4А1604У3.

Асинхронные двигатели общего назначения выпускаются как на низкое напряжение мощностью от 0,6 до нескольких сот киловатт, так и на высокие напряжения 3, 6 или 10 кВ, мощностью до нескольких десятков тысяч киловатт. Наиболее распространены низковольтные двигатели малой и средней мощности, являющиеся основными двигателями в промышленности и сельском хозяйстве[1].

На рис. 1-3 показан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 15 кВт при $2p=4$ на напряжение 220/380 В. Конструктивная форма исполнения двигателя IM1001, исполнение по способу защиты IP44. Такое исполне-

[1] Асинхронные двигатели мощностью менее 0,6 кВт относятся к так называемым «микромашинам» и в данной работе не рассматриваются.

ние характерно для большинства асинхронных машин мощностью менее 50—70 кВт. Низковольтные двигатели большей мощности с фазными и с короткозамкнутыми роторами выпускаются в большинстве случаев в двух исполнениях — IP23 и IP44. На рис. 1-4 показан асинхронный двигатель серии 4А с фазным ротором мощностью 250 кВт при $2p=4$ исполнения IP23. Двигатели с такой конструкцией корпуса выпускаются с высотами оси вращения $h=280\div355$ мм как с фазными, так и с короткозамкнутыми роторами.

Синхронные машины общего назначения распространены значительно меньше, чем асинхронные. Это объясняется тем, что синхронные генераторы сравнительно небольшой мощности (до нескольких

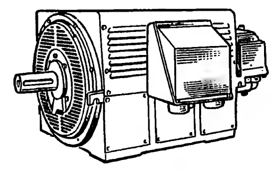


Рис. 1.4. Асинхронный двигатель серии 4А с фазным ротором, $h=315$ мм, $2p=4$. $U_н=380/660$ В, защищенного исполнения 4АН315М4У3.

тысяч киловатт) применяются в автономных установках. Синхронные двигатели не получили широкого распространения из-за более сложной конструкции, большей стоимости и худших пусковых характеристик. Однако они находят применение в приводах компрессоров, воздуходувок и т. п. Синхронные машины могут быть использованы одновременно и как двигатели и как генераторы реактивной энергии, что дает им большое преимущество перед асинхронными двигателями, являющимися потребителями реактивной энергии.

Синхронные машины в зависимости от конструкции роторов разделяются на типы с явно- и неявно выраженными полюсами.

В явнополюсной конструкции более удобно располагать обмотку возбуждения, чем в пазах ротора с неявно выраженными полюсами. Поэтому все синхронные машины с числом пар полюсов более двух выполняются с явнополюсным ротором. В двухполюсных машинах из-за большой частоты вращения центробежные силы, действующие на ротор, настолько велики, что не удается надежно закрепить на нем явно выраженные полюсы с обмоткой. Обмотку возбуждения приходится укладывать в отдельные пазы, рассредоточивая их по окружности ротора.

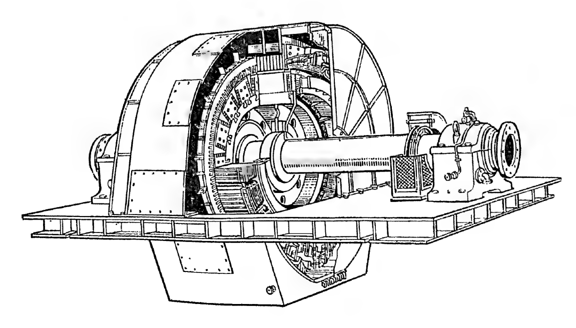


Рис. 1-5. Синхронный двигатель.

Синхронные машины общепромышленного применения выполняются в основном с явнополюсными роторами. На рис. 1-5 показан синхронный двигатель мощностью 17 500 кВт на частоту вращения 375 об/мин. Из-за большого веса вала и ротора его подшипниковые узлы установлены на подшипниковых стойках вне корпуса машины.

Наряду с крупными синхронными машинами выпускаются синхронные двигатели и генераторы мощностью менее 100 кВт на низкое напряжение. Для упрощения эксплуатации и повышения надежности таких машин они выполняются с самовозбуждением (обмотка возбуждения питается постоянным током от выводов статора через выпрямитель). В последние годы разработаны также конструкции синхронных машин, в которых отсутствует скользящий контакт. При этом выпрямительные элементы установлены на роторе, а ток в обмотке возбуждения возникает за счет высших гармоник поля, создаваемых обмоткой статора.

Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне, обладают высокими пусковыми и перегрузочными моментами. Это определило их распространение в приводах, требующих изменения частоты вращения или специальных скоростных характеристик: в станкостроении, в металлургической промышленности, на электротранспорте, в текстильной и полиграфической промышленности и других отраслях народного хозяйства.

Генераторы постоянного тока устанавливаются для питания обмоток возбуждения синхронных машин, в системах генератор — двигатель и в некоторых специальных производствах, как, например, в химической промышленности для целей электролиза, и т. п.

В то же время машины постоянного тока не получили такого широкого распространения, как асинхронные, из-за меньшей надежности, сложности эксплуатации и большей стоимости, обусловленных наличием в их конструкции механического преобразователя частоты — коллектора. Машины постоянного тока могут иметь различные конструкции коллектора, якоря, обмоток и полюсов. Машины общего назначения, проектирование которых рассмотрено в последующих главах книги, имеют вращающийся якорь, цилиндрический коллектор и неподвижные полюсы с обмотками возбуждения, расположенными на станине.

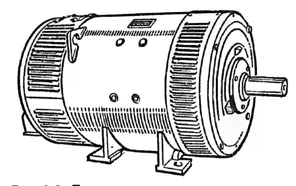


Рис. 1-6. Двигатель постоянного тока серии 2ПН, высота оси вращения $h=280$ мм, степень защиты IP22, способ охлаждения IC01.

На рис. 1-6 показан двигатель постоянного тока мощностью 110 кВт, $n_н=1500$ об/мин, исполнения по степени защиты IP22. Такое исполнение является типичным для двигателей постоянного тока общепромышленного применения, так как они большей частью устанавливаются в помещениях, в которых исключается попадание на машины капель, падающих под углом более 15° к вертикали. Для установки в помещениях с загрязненным воздухом двигатели постоянного тока выпускают в исполнении IP44 с различными системами охлаждения наружной поверхности корпуса.

1-5. УНИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР

Стандартизация в СССР является частью общегосударственной технической политики, средством внедрения в производство передовых достижений науки, обеспечения оптимального уровня качества продукции, экономии трудовых и мате-

риальных затрат. Унификация базируется на анализе требований различных министерств и ведомств и разработке единых серий электрооборудования. На базе единых серий машин и трансформаторов разрабатываются модификации, предназначенные для различных условий работы. Внутри серии проводится максимальная унификация узлов и деталей.

Стандартизация в электротехнической промышленности строится на базе государственной системы стандартизации. Стандарты СССР подразделяются на следующие категории:

государственные стандарты СССР (ГОСТ); отраслевые стандарты (ОСТ); республиканские стандарты (РСТ); стандарты предприятий (СТП).

Стандарты в СССР являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Кроме стандартов утверждаются технические условия (ТУ), представляющие собой распространенный вид нормативно-технической документации.

В основу стандартизации подотраслей электротехнической промышленности положены базовые стандарты. Таким стандартом для электрических машин является ГОСТ 183-74, устанавливающий общие технические требования на все электрические машины. На основе единых стандартов подотрасли устанавливаются стандарты на единые серии (например, на асинхронные, синхронные машины и др.).

При стандартизации электрооборудования применяются ряды предпочтительных чисел, построенные на геометрической прогрессии:

$$a;\ ax;\ ax^2,\ \ldots,\ ax^{n-1}.$$

Оказалось достаточным иметь четыре десятичных ряда геометрической прогрессии:

Ряд	Знаменатель ряда	Количество членов в пределах ряда
$R5$	$\varphi_5 = \sqrt[5]{10} = 1,6$	5
$R10$	$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} = 1,25$	10
$R20$	$\varphi_{20} = \sqrt[20]{10} = 1,12$	20
$R40$	$\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} = 1,06$	40

Каждый ряд построен на знаменателе прогрессии φ_5, φ_{10}, φ_{20}, φ_{40} в интервале от 1 до 10. Числа свыше 10 получаются умножением на 10; 100; 1000 и т. д., а числа, меньшие 1, — умножением на 0,1; 0,01; 0,0001 и т. д.

По предпочтительным числам и геометрическим рядам предпочтительных чисел построены ряды мощностей электродвигателей, трансформаторов и автотрансформаторов.

Разработанный в СССР государственный стандарт на шкалу мощностей (ГОСТ 12139-74) приведен в табл. 1-3. Этот ряд мощностей наиболее массовых серий электродвигателей максимально приближается к ряду предпочтительных чисел $R10$.

Таблица 1-3

Ряд мощностей по ГОСТ 12139-74 (в диапазоне от 0,06 до 1000 кВт)

0,06	1,5	22	160
0,09	2,2	30	200
0,12	3,0	37	250
0,18	4,0	45	315
0,25	5,5	55	400
0,37	7,5	75	500
0,55	11	90	630
0,75	15	110	800
1,1	18,5	132	1000

В стандартах на электрические машины кроме размеров, технических требований и методов испытаний устанавливаются основные показатели: номинальные напряжения в вольтах, частота вращения (синхронная) в оборотах в минуту и мощности в киловаттах или ваттах.

Размеры электрических машин, определяющие возможность их монтажа и сочленения с рабочими механизмами (высота оси вращения, диаметры концов валов), устанавливаются в соответствии с ГОСТ 6636-69 «Нормальные линейные размеры». Этот ГОСТ устанавливает ряды линейных размеров в интервале от 0,001 до 20 000 мм, которые применяются в машиностроении.

Аттестация качества продукции — один из постоянно действую-

щих факторов, стимулирующих создание продукции, превосходящей по своим технико-экономическим показателям лучшие отечественные и мировые достижения. Аттестация качества продукции производится на основании «Основных положений единой системы аттестации качества промышленной продукции (ЕСАКП)». ЕСАКП объединяет государственную, отраслевую и заводскую аттестации.

В ЕСАКП установлено, что продукция аттестуется по трем категориям качества: высшей, первой и второй.

К высшей категории относится продукция, соответствующая или превосходящая по своим технико-экономическим показателям высшие достижения отечественной и зарубежной науки и техники. Этой продукции присваивается государственный Знак качества.

К первой категории относится продукция, которая по своим технико-экономическим показателям соответствует современным требованиям действующих стандартов и технических условий.

Ко второй категории относится продукция, которая не соответствует современным требованиям, подлежит модернизации или снятию с производства.

Вновь разрабатываемые изделия, передаваемые в серийное производство, должны соответствовать высшей категории качества. За прошедшие годы в электротехнической промышленности аттестована практически вся продукция.

Надежность машин неотделима от понятия качества, но понятие надежности более узкое, так как качество сочетает энергетические показатели, стоимость и технический уровень электрической машины.

1-6. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Повышение надежности электрических машин — важная задача электротехнической промышленности. Увеличение срока службы и повышение надежности зачастую дают относительно больший народнохозяйственный эффект, чем улучшение КПД и $\cos\varphi$.

Согласно ГОСТ 13377-75 «Надежность в технике. Термины и определения» надежность — это свойство объекта, заключающееся в его способности выполнять определенные задачи в определенных условиях эксплуатации. Одной из основных характеристик надежности является вероятность безотказной работы, т. е. вероятность того, что в заданном интервале времени отказ изделия не возникнет. Отказ — это событие, заключающееся в нарушении работоспособности изделия. Отказы бывают внезапные и постепенные. Внезапные отказы (короткое замыкание, обрыв провода, заклинивание подшипников) приводят к полному нарушению работоспособности. Постепенные отказы обусловлены изменением параметров элементов технических изделий в связи со старением и износом.

Мерой надежности является интенсивность отказов, т. е. плотность распределения наработки изделия до отказа, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента отказ не возник.

Кроме вышеназванных к основным понятиям теории надежности относятся следующие. Безотказность — свойство изделия непрерывно сохранять работоспособность. Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособность до наступления предельного состояния с необходимыми перерывами для технического обслуживания и ремонта. Работоспособность — состояние изделия, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией. Ремонтопригодность — свойство изделия, заключающееся в приспособленности к выполнению его ремонтов и технического обслуживания. Наработка — продолжительность или объем работы, выполняемый изделием. Ресурс — наработка изделия до наступления предельного состояния. Срок службы — календарная продолжительность эксплуатации от определен-

ного момента до предельного состояния. Средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки до первого отказа. Восстанавливаемое и невосстанавливаемое изделие — изделие, работоспособность которого в случае возникновения отказа соответственно подлежит или не подлежит восстановлению в рассматриваемой ситуации.

Математическая трактовка, необходимая для количественной оценки показателей надежности, базируется на теории вероятности и математической статистике. Вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени $P(t)$ является убывающей функцией и обладает следующими свойствами:

$$0 \leqslant P(t) \leqslant 1; \quad P(0) = 1; \quad P(\infty) = 0.$$

Вероятность отказа изделия

$$Q(t) = 1 - P(t). \qquad (1\text{-}4)$$

Частота отказов

$$a(t) = \frac{\Delta n}{n\,\Delta t}, \qquad (1\text{-}5)$$

где Δn — число отказавших изделий в интервале времени Δt;

n — общее число изделий, подвергаемых испытанию.

Интенсивность отказов

$$\lambda' = \frac{\Delta n}{n_{\text{ср}}\,\Delta t}, \qquad (1\text{-}6)$$

где $n_{\text{ср}}$ — среднее значение исправно работающих изделий в интервале Δt.

Среднее время безотказной работы (средняя наработка до первого отказа) есть математическое ожидание времени безотказной работы:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^t P(t)\,dt. \qquad (1\text{-}7)$$

Практика эксплуатации электротехнических изделий позволила выделить три основных периода их функционирования: период приработки, когда происходит отбраковка технологических конструктивных и производственных дефектов; период нормальной эксплуатации (с внезапными отказами); период старения, когда появляются отказы, вызванные износом элементов изделия. Кривая интенсивности отказов для трех периодов работы технических устройств, к которым могут быть отнесены и электрические машины, представлена на рис. 1-7. В начале периода приработки (от 0 до t_1) интенсивность отказов весьма значительна и затем постепенно

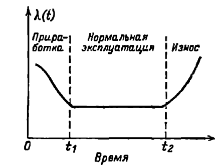


Рис. 1-7. Кривая интенсивности отказов асинхронных двигателей.

спадает. В период нормальной эксплуатации (от t_1 до t_2) интенсивность отказов минимальна и в среднем приблизительно постоянна. Период нормальной эксплуатации соответствует работе машин как однократного, так и многократного использования; период износа относится только к ремонтируемым изделиям многократного использования. Отказы, имеющие место в период приработки, стремятся ликвидировать путем замены отдельных узлов. Например, перед выпуском с завода предварительно производятся притирка щеток на коллекторе или на кольцах, наладка подшипниковых узлов и т. д.

Внезапные отказы электрических изделий (обычно в периоде нормальной эксплуатации) подчиняются экспоненциальному закону распределения, износовые отказы — приблизительно нормальному закону, отказы в период приработки можно с определенной степенью достоверности отнести к распределению Вейбулла [14]. Экспоненциальное распределение имеет место только при постоянстве интенсивности внезапных отказов. Нормальное распределение (двухпараметрическое) имеет место в том случае, когда на исследуемый объект воздействует целый ряд случайных факторов. В электрических машинах к нормальному закону близко

распределение отказов щеточно-коллекторного узла.

Современные технические изделия представляют собой сложные объекты, состоящие из различных элементов и частей. Каждая из этих частей имеет различные значения вероятности безотказной работы. Для расчета вероятности безотказной работы всей системы в целом необходимо учитывать все основные входящие в нее элементы. Результирующее значение вероятности безотказной работы зависит от типа соединения элементов (с точки зрения надежности) — последовательного или параллельного. При последовательном соединении из n элементов вероятность безотказной работы всего изделия определяется следующим образом:

$$P(t) = P_1(t) P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t), \qquad (1\text{-}8)$$

где $P_i(t)$ — надежность i-го элемента.

Электрическую машину следует рассматривать как изделие из последовательно соединенных элементов (подшипников, обмоток, коллектора и т. д.). При этом отказ любого из них приводит к потере работоспособности машины.

Электрическая машина рассматривается как совокупность подобъектов, т. е. основных узлов, из которых она состоит. Аналитическим или экспериментальным путем определяется надежность каждого из выделенных основных узлов. После этого определяется надежность машины в целом.

Изоляция обмоток электрических машин в значительной мере определяет надежность обмотки. Разрушение изоляции происходит в результате влияния совокупности разнообразных факторов: вибрации, нагрева, влажности, запыления, агрессивности окружающей среды.

Наиболее строго пока решена задача старения изоляции, точнее— определения срока службы того или иного класса изоляции при определенной температуре окружающей среды. Для качественной оценки срока службы изоляции класса А пригодно экспериментально найденное «правило восьми градусов»: повышение температуры на каждые 8° С выше допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое.

Количество отказов подшипников для различных классов машин колеблется от 10 до 80% общего числа отказов. Подшипниковые узлы электрических машин подвержены в основном абразивкому износу из-за проникновения в подшипник щеточной пыли, мелких частиц, продуктов коррозии, что приводит к постепенному истиранию сепараторов и дорожек качения. Критериями работоспособности подшипников являются температура (обычно измеряется температура наружного кольца), время выбега, шум и спектр вибрационных частот. При ненормальной работе подшипника наблюдаются резкое повышение температуры, значительный шум, повышенное сопротивление при трогании и вращении, утечка смазки и, наконец, разрушение или заклинивание.

В машинах постоянного тока кроме рассмотренных подшипникового узла и изоляции подлежит исследованию на надежность коллекторно-щеточный узел. Анализ статистических данных показывает, что процент отказов двигателей постоянного тока по причине неблагоприятной работы коллекторно-щеточного узла колеблется от 10 до 50%, а у некоторых типов прокатных и тяговых двигателей — до 65%.

Основными критериями работоспособности для коллектора являются уровень искрения, биение и температура, а для щеток — износ. На работоспособность коллекторно-щеточного узла влияет ряд электромагнитных, физико-химических и механических факторов. Сюда относятся условия коммутации (в значительной мере определяемые настройкой добавочных полюсов), марка щеток и материал коллектора, давление на щетку, частота вращения. Из химических факторов — состояние контактной пленки на поверхности коллектора (политуры),

влажность и агрессивность окружающей среды. Весьма существенны также уровень вибрации, окружающая температура, эксцентриситет и биение коллектора.

При относительной простоте конструкции надежность асинхронных двигателей все еще остается весьма низкой и колеблется в зависимости от области использования от 60—80 тыс. ч (в химической промышленности) до 5—6 тыс. ч (в горнодобывающей промышленности). Средний срок службы их составляет около 20 000 ч (5 лет). Выход из строя двигателей в основном зависит от недостатков эксплуатации, низкого качества ремонта, от технологических дефектов и неправильного применения. Всего 10—12% двигателей выходят из строя вследствие процессов старения и износа.

Как объект исследования на надежность асинхронные двигатели представляют собой совокупности двух узлов — подшипникового узла и обмотки. При этом согласно статистике на долю подшипников приходится до 8%, на долю обмотки 85—95% отказов.

Статоры асинхронных двигателей малой и средней мощности имеют в основном всыпную обмотку. При этом отказы распределены следующим образом: межвитковые замыкания 93%, повреждения междуфазной изоляции 5%, пазовой изоляции 2%.

Повышение надежности асинхронных двигателей идет по пути новых конструктивных решений как всего двигателя, так и отдельных узлов, снижения температуры наиболее нагретых участков, применения изоляции более высокого класса нагревостойкости, капсулирования всыпных обмоток (посредством литой оболочки из термореактивного компаунда), улучшения технологии и совершенствования методов контроля.

К основным причинам, приводящим к выходу из строя синхронных машин, следует отнести повреждение обмотки статора, ослабление запрессовки активной стали, механические повреждения ротора, а также обмотки ротора, неисправности подшипников и подпятников. Повышение надежности синхронных машин может быть достигнуто путем использования новых активных, изоляционных и конструктивных материалов, разработки новых высоконадежных конструкций, улучшения технологии изготовления и контроля качества.

Наряду со статистической обработкой данных эксплуатации для оценки надежности электрических машин используются также определительные и контрольные испытания. Определительные испытания проводятся для определения фактических показателей надежности, контрольные — для контроля соответствия показателей требованиям стандартов или технических условий.

Для определительных испытаний объем выборки (количество машин, случайным образом отобранных из партии или серии, подлежащих испытаниям) составляет 20—30 машин. Испытания проводятся до отказа всех машин выборки, что позволяет построить кривую вероятности безотказной работы в функции наработки.

Контрольные испытания проводятся либо для одного уровня (риск заказчика β), либо для двух (риск заказчика β и риск изготовителя α). Для соответствующих значений β и α по таблицам определяется объем выборки, необходимый для подтверждения требуемого значения вероятности безотказной работы [14]. Машины ставятся на испытания. В случае, если число отказавших во время испытаний машин α не превышает некоторого числа c — так называемого приемочного числа, требуемый уровень вероятности безотказной работы $P(t)$ подтверждается. В противном случае гипотеза о соответствии надежности партии машин требуемому уровню отклоняется.

Испытания на надежность, как определительные, так и контрольные, весьма длительные и дорогостоящие. Кроме того, данные испытания зачастую запаздывают и не могут дать оперативной коррекции при конструировании и совершен-

ствовании технологии. Проблема сокращения времени испытаний решается проведением ускоренных испытаний на надежность. В этом случае испытания электрических машин проводятся в специальных условиях, характеризующихся повышенным уровнем некоторых воздействующих факторов. К факторам форсировки относятся: повышенная температура окружающей среды, повышенная вибрация, повышение выше номинальных частоты вращения и нагрузки, частые пуски, повышенная влажность, повышенные удельное нажатие и плотность тока под щеткой, запыленность и некоторые другие.

Ускоренным испытаниям данного типа машин определенной мощности или диапазона мощностей предшествуют испытания по определению коэффициента ускорения. Коэффициент ускорения $k_у$ есть отношение времени, в течение которого вероятность безотказной работы машины в номинальном режиме составляет $P(t)$, ко времени, в течение которого та же вероятность $P(t)$ будет в режиме форсировки. Необходимо соблюдение адекватности законов распределения в форсированном и нормальном режимах — это в свою очередь означает, что при форсированных испытаниях не должна нарушаться физика старения и износа материалов и конструкции электрической машины. Количество факторов форсировки обычно варьируется от двух до четырех. Электрические машины могут быть испытаны с коэффициентом ускорения 10—15, что значительно сокращает время испытаний.

Таблица 1-4

Основные разделы курсового проекта, их относительный объем и сроки выполнения

№ п/п.	Наименование разделов проекта	Объем раздела, %	Сроки выполнения по неделям семестра
1	Выбор главных размеров	5	
2	Электромагнитный расчет	35	
3	Разработка конструкции (выполнение чертежей общих видов в тонких линиях)	30	
4	Механические расчеты	5	
5	Вентиляционный расчет	5	
6	Тепловой расчет	5	
7	Экономический расчет	5	
8	Завершение чертежей и оформление пояснительной записки	10	

Примечания: 1. Сроки выполнения основных разделов проставляются при выдаче задания на курсовое проектирование.

2. Объем каждого раздела в процентах к полному объему проекта дан ориентировочно и служит для приблизительной оценки объемов выполненной и оставшейся части работы.

1-7. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ УЧЕБНОГО ПРОЕКТА

Техническое задание на курсовой проект содержит основные данные проектируемой машины, указания о режиме ее работы, конструктивном исполнении, виде защиты от окружающей среды и системе вентиляции. Помимо этого могут быть также заданы дополнительные требования, например диапазон регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока, наименьшие допустимые значения кратности пускового и максимального момента асинхронных двигателей и т. п. Проектируемая машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТ.

При работе над проектом, если нет специальных указаний, следует ориентироваться на конструктивное исполнение, принятое в машинах современных серий.

Курсовой проект состоит из разделов, перечисленных в табл. 1-4, где указан примерный объем работы, необходимый для выполнения каждого раздела, в процентах ко всему объему проекта. Отдельные разделы проекта должны быть выполнены и представлены для проверки руководителю в установленные сроки (см. табл. 1-4). Это дает возможность своевременно исправить допущенные ошибки и организовать равномерную работу над проектом в течение семестра.

В качестве основного пособия для проектирования электрических машин общепромышленного назначения может быть использована настоящая книга. Однако для полноты проработки материала необходимо использовать также и другие источники. Так, при разработке конструкции машины следует обратиться к заводским чертежам аналогичных машин, близких по габаритам к заданной в проектном задании, каталогам на электрические машины. В [2] подробно рассмотрены примеры общей компоновки машин и конструкция их отдельных узлов и деталей. Помимо этого следует познакомиться по [6] с технологией изготовления основных деталей и сборки, а по [5] — с конструкцией изоляции и изоляционными материалами, применяемыми в электрических машинах различных назначений и мощностей.

Расчеты машин проводятся в последовательности, изложенной в соответствующих разделах данной книги. Вначале выбирают главные размеры и выполняют электромагнитный расчет, в процессе которого определяются обмоточные данные и размеры машины. Электромагнитные расчеты заканчиваются построением основных характеристик.

После окончания электромагнитного расчета должны быть выполнены в тонких линиях чертежи машины. В процессе конструирования проверяются выбранные ранее размерные соотношения деталей и узлов.

Вентиляционный, тепловой и механические расчеты выполняются, исходя из размеров, полученных в расчете и на чертеже. Содержание и объем этих расчетов определяются руководителем проекта в зависимости от требования технического задания.

Экономический расчет является заключительным при учебном проектировании. Его объем, а также методика проведения определяются кафедрой, ведущей проектирование. Вопросы экономики учитываются в течение всей работы над проектом, начиная с выбора главных размеров, конструирования изоляции, выбора той или иной марки обмоточных проводов и т. п.

К защите проекта представляются чертежи спроектированной машины и пояснительная записка.

Пояснительная записка должна содержать окончательные варианты расчетов всех разделов проекта. Если в процессе работы выявилась необходимость изменения каких-либо первоначально принятых размеров или рассчитанных данных, потребовавшая пересчета ряда позиций, то первоначальные варианты расчета в текст пояснительной записки не включаются. К принятому окончательному варианту в этом случае необходимо сделать краткое пояснение.

В тексте записки необходимые по ходу расчета пояснения и обоснования следует излагать кратко и ясно. При записи расчетов нужно обязательно привести расчетную формулу в общем виде, затем ту же формулу с заменой символов соответствующими числами и, наконец, численный результат с указанием единицы полученной величины. Результаты промежуточных вычислений могут быть опущены. Все расчеты рекомендуется проводить в системе СИ.

Текст пояснительной записки должен сопровождаться достаточным количеством иллюстраций — эскизов, графиков, в полной мере поясняющих принятые в расчете обозначения размеров и полученные размерные соотношения. Все рисунки должны быть выполнены с точным соблюдением масштаба, что позволяет вовремя заметить возможные ошибки в расчете. Пояснительная записка выполняется на стандартных листах писчей бумаги формата 11. Текст пишется чернилами. Оборотная сторона листов не используется. Страницы записки необходимо пронумеровать, рисунки выполнить на отдельных листах чертежной или миллиметровой бумаги того же формата и сброшюровать вместе с текстом.

Графическая часть проекта обычно состоит из двух-трех листов чертежей формата 24 и содержит

чертежи общих видов машин с необходимыми для пояснения конструкции разрезами и нескольких деталей, поперечные размеры пазов с расположенными в них проводниками и изоляцией обмотки, схему обмотки и основные характеристики спроектированной машины. Объем и содержание графической части проекта корректируются в зависимости от требований технического задания и времени, отведенного в учебных планах на выполнение курсового проекта.

Глава вторая

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРОМАШИНОСТРОЕНИИ

Расчеты электрических машин достигли такого совершенства, что в настоящее время улучшение показателей общепромышленных машин может быть достигнуто в основном за счет повышения качества материалов, применяемых при их изготовлении. Принято делить материалы на активные (магнитные и проводниковые) и конструкционные. Это деление условно, так как во многих случаях функции эти совмещаются. Магнитные, проводниковые, изоляционные и конструкционные материалы обеспечивают необходимое распределение электромагнитных и тепловых полей в электрической машине.

2-1. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, листовая сталь, чугун и магнитодиэлектрики.

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТ 21427.0-75 разделяется на 38 марок. Она изготовляется в виде рулонов, листов и резаной ленты и предназначается для изготовления магнитопроводов электрических машин, аппаратов и приборов.

Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки; вторая — содержание кремния; третья — группу по основной нормируемой характеристике. Эти три первые цифры в обозначении марки означают тип стали, а четвертая — порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на три класса:

1 — горячекатаную изотропную сталь; 2 — холоднокатаную изотропную сталь; 3 — холоднокатаную анизотропную сталь с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на шесть групп:

0 — с содержанием кремния до 0,4% включительно (нелегированная); 1 — с содержанием кремния от 0,4 до 0,8%; 2 — с содержанием кремния 0,8—1,8%; 3 — с 1,8—2,8%; 4 — с 2,8—3,8%; 5 — с 3,8—4,8%.

По ГОСТ 21427.0-75 химический состав стали не нормируется.

По основной нормируемой характеристике стали делятся на пять групп:

0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,7/50}$); 1 — удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,5/50}$); 2 — удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1,0/400}$); 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и от условий ее изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую относительную магнитную проницаемость и бóльшие магнитные потери, а также большую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую относительную магнитную проницаемость в слабых и средних полях. Присадка кремнием снижает плотность и повышает

удельное электрическое сопротивление стали. Для стали с содержанием кремния 0,8—1,8% плотность 7800 кг/м^3, удельное сопротивление $0{,}25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Для стали с содержанием кремния 3,8—4,8% плотность 7550 кг/м^3, удельное сопротивление $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

В электротехнической промышленности широко применяются анизотропные холоднокатаные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатаные стали. В анизотропных сталях магнитные свойства вдоль прокатки и направлении, перпендикулярном прокатке, — различные.

В последние годы созданы изотропные холоднокатаные стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном направлении (ГОСТ 21427.2-75).

Горячекатаная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготавливается в виде листов по ГОСТ 21427.3-75 следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

По точности прокатки по толщине сталь подразделяют на сталь нормальной (Н) и повышенной (П) точности.

На электротехнические заводы листы поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленой (Т) и с нетравленой (НТ) поверхностью. Поверхность листов должна быть гладкой, без ржавчины, отслаивающей окалины, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

Пример условного обозначения листа толщиной 0,50 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности прокатки, класса неплоскостности 2, с травленой поверхностью, из стали марки 1512: лист 0,50×1000×2000-П-2-Т-1512 ГОСТ 21427.3-75.

На электротехническую холоднокатаную анизотропную тонколистовую сталь, изготовляемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1-75, соответствующий стандарту СЭВ СТ 102-74. Эта сталь выпускается следующих марок: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

По видам продукции сталь подразделяется на лист, рулон, ленту резаную, по точности прокатки и неплоскостности — так же, как горячекатаная. По виду покрытия: с электроизоляционным термостойким покрытием (ЭТ), с покрытием, не ухудшающим штампуемость (М) — мягкое, без электроизоляционного покрытия (БП).

Рулонную сталь изготовляют толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,50 мм и шириной 750, 860 и 1000 мм. Резаную ленту изготовляют толщиной 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 мм, шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм. Предельные отклонения по толщине стали, по ширине рулона и ленты, неплоскостность оговариваются ГОСТ. Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготовляют с электроизоляционным термостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм — без электроизоляционного термостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость. Магнитные свойства стали приведены в приложении.

Тонколистовая холоднокатаная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты и имеет следующие марки: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412.

По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП). Изотропную рулонную сталь изготовляют толщиной 0,35; 0,50; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 860 и 1000 мм.

Таблица 2-1
Коэффициент заполнения пакета сталью k_c

Толщина листов, мм	Изоляция листов	
	оксидированные	лакированные
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Магнитные свойства сталей характеризуют кривые намагничивания, приведенные в таблицах в приложении. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса определяются удельными потерями, т. е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном напряжении. Удельные потери в стали приведены в таблицах.

Для уменьшения потерь от вихревых токов листы стали изолируются лаком или выпускаются с термостойким покрытием. Изоляционные прослойки уменьшают активное сечение пакета стали, что учитывается коэффициентом заполнения пакета сталью k_c. Этот коэффициент характеризует отношение сечения стали (без изоляции) ко всему сечению пакета. В табл. 2-1 приведено значение k_c в зависимости от изоляции и толщины листов. В таблице даны усредненные значения, так как k_c зависит от степени прессовки листов и длины пакетов.

Роторы короткозамкнутых асинхронных машин с заливкой пазов алюминием собираются из неизолированных листов. В этом случае k_c берется равным 0,95.

Для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях, применяется техническое железо с содержанием углерода менее 0,04%, а также углеродистые стали и чугуны.

Для изготовления магнитопроводов находят применение и магнитодиэлектрики — материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление.

Листовая сталь 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Для полюсов синхронных машин применяются стали толщиной 1—2 мм и более. Это ведет к улучшению k_c, который достигает значений 0,95—0,98.

Листовая сталь применяется для сварных станин машин постоянного тока и изготовления ободов роторов синхронных машин. Толщина листовой стали колеблется от 1,5 до 12 мм. Магнитные свойства такие же, что и у литой стали.

Стальное литье применяется для изготовления станин и роторов синхронных машин. Магнитные характеристики углеродистой стали приведены в приложении. Кованые стали находят применение при изготовлении роторов синхронных машин и добавочных полюсов машин постоянного тока. Чугун в последнее время в электромашиностроении применяется все реже из-за плохих магнитных свойств.

2-2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К проводниковым материалам, применяемым в электромашиностроении, в первую очередь относятся медь и алюминий. Серебро, имеющее удельное сопротивление на 4% меньшее по сравнению с медью, относится к дефицитным материалам и почти не применяется при изготовлении электрических машин.

Почти все изделия из меди для электротехнической промышленности изготавливаются путем проката, прессования и волочения. Волочением получаются провода диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и фольга толщиной до 0,008 мм. При механических деформациях медь подвергается наклепу, который может быть устранен термообработкой.

Для изготовления коллекторов машин постоянного тока применяется твердотянутая медь с присадкой кадмия. Кадмий увеличивает механическую прочность меди и благоприятно сказывается на качестве пленки на поверхности пластин, улучшая коммутацию.

Высокая электрическая проводимость обеспечивает широкое применение алюминия в электротехнической промышленности. Важными свойствами алюминия являются его малая плотность, низкая температура плавления, высокая пластичность, прочная и очень тонкая пленка окиси, защищающая алюминий от коррозии. Алюминий хорошо обрабатывается давлением, и из него получаются листы, проволока, тончайшая фольга и штампованные детали. Плотность алюминия в 3,3 раза ниже, а удельное сопротивление лишь в 1,7 раза выше, чем у меди. Поэтому на единицу массы алюминий имеет вдвое более высокую проводимость, чем медь.

Алюминиевые провода изготавливаются из алюминия марки АЕ, имеющего в своем составе 99,5% чистого алюминия и 0,5% примесей железа и кремния.

Для литейных сплавов наиболее употребительны сплавы АЛ2 и АЛ9.

Для заливки роторов асинхронных машин применяются сплавы, характеристики которых приведены в табл. 2-2.

Таблица 2-2

Алюминиевые сплавы для заливки роторов асинхронных двигателей

Марка сплава	Удельная проводимость при 120°С, МСм/м	Средняя линейная усадка, %	Характеристика литейно-технологических свойств
Алюминий чистый АК3	32 25	1,8	Ограниченные литейные свойства и жидкотечность
АКМ2-1 АКМ4-4	25 19		Чувствительны к образованию горячих трещин. Рекомендуются для заливки роторов с тонкими стержнями
АК10 АКМц10-2	19 15	1,3	Высокие литейные свойства и жидкотекучесть до 800° С Пригодны для любых роторов, особенно с тонкими стержнями
АКМ12-4	15	1,3	Равноценен АК10. Из-за концентрированной усадки нежелательно применять для роторов с толстыми стержнями
АМг7	19	1,3	Невысокие литейные свойства, подвержен окислению при заливке. Применяется для специальных роторов
АКЦ11-12	12	1,3	Высокие литейные свойства. Пригоден для заливки любых роторов

Сплавы, указанные в табл. 2-2, применяются при литье под давлением и центробежной заливке. Сплавы АК3, АКМ4-4 и АМг7 применяются только при литье под давлением. Температура плавления 640—740° С.

Латуни (сплавы меди с цинком) и бронзы (сплавы меди с кадмием, бериллием и фосфором) применяются для изготовления короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей и демпферных обмоток синхронных машин. Они хорошо обрабатываются, имеют малую усадку и применяются также для изготовления токоведущих деталей сложной формы.

В целях экономии меди контактные кольца асинхронных машин с фазным ротором выполняются из стали или чугуна. Из стали выполняются и роторы специальных асинхронных двигателей. Но двигатели с массивным ротором применяются редко. В этом случае имеет место совмещение магнитных и проводниковых функций материала.

При низких температурах, близких к абсолютному нулю, медь становится плохим проводником. В сверхпроводящих и криорезистивных проводах применяются сплавы ниобия с титаном [36].

2-3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы или диэлектрики применяются в электромашиностроении для изоляции частей электрической машины, находящихся под разными по-

Таблица 2-3

Нагревостойкость электроизоляционных материалов (по ГОСТ 8865-70)

Класс нагревостойкости	Температура, °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
Y	90	Не пропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
A	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
E	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

тенциалами.

Диэлектрики делятся на газообразные, жидкие и твердые. В электрических машинах в основном применяются твердые изоляционные материалы.

Толщина междувитковой и пазовой изоляции во многом определяет массогабаритные показатели машин. Нагревостойкость и теплопроводность изоляции определяют допустимые температуры частей машины и выбор электромагнитных нагрузок. Изоляция должна обладать необходимыми механическими свойствами и допускать механизацию и автоматизацию технологических процессов изготовления. Изоляция во многом определяет качество электрической машины.

Срок службы электрической машины в нормальных условиях (15—20 лет) определяется главным образом сроком службы изоляции. При нагреве изоляции имеют место процессы, приводящие к старению изоляции, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

В основу классификации изоляции положена нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации.

Согласно ГОСТ 8865-70 электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, делятся на семь классов в соответствии с предельно допустимыми для них температурами (табл. 2-3).

Указанные в табл. 2-3 температуры соответствуют самому нагретому месту изоляции при номинальном режиме. С электроизоляционными материалами данного класса допу-

скается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что комплексная изоляция не будет претерпевать изменений, могущих сделать ее непригодной для длительной работы.

Ниже приводится ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости.

К классу нагревостойкости изоляции Y относятся текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов. К этому классу относятся также целлюлозные электроизоляционные бумаги, картоны и фибра, древесина, пластические массы с органическими накопителями.

Класс нагревостойкости изоляции А включает: материалы класса Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики; ацетобутиратцеллюлозные, ацетилцеллюлозные и диацетатные пленки; пленкоэлектрокартон на основе ацетилцеллюлозной пленки; лакоткани, лакобумаги и лакочулки; изоляция эмалированных проводов; слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей; полиамидные пленки; полиамидные литьевые смолы; асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110° С; древеснослоистые пластики; термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров.

При производстве машин материалы класса А могут пропитываться или покрываться лаками на основе натуральных смол, эфирцеллюлозными лаками и термопластичными компаундами.

В класс нагревостойкости изоляции Е входят пленки и волокна из полиэтилентерефталата; материалы на основе электроизоляционного картона и полиэтилентерефталатной пленки; стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон; термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые).

К классу нагревостойкости изоляции В относятся: материалы на основе щепаной слюды, слюдопластов и слюдинитов, включая с бумажной или тканевой органической подложкой; стеклоткани и стеклолакочулки; асбестовые волокнистые материалы; изоляции эмалированных проводов; пластмассы с неорганическим наполнителем; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов; термореактивные синтетические компаунды, асбестоцемент.

В качестве пропитывающих и покровных составов при производстве для класса изоляции В применяются битумно-масляно-смоляные лаки и лаки на основе природных и синтетических смол.

Класс нагревостойкости изоляции F включает материалы на основе щепаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой; стекловолокнистую и асбестовую изоляцию проводов; стеклоткани и стеклолакочулки; слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. При пропитке применяются соответствующие данному классу нагревостойкости лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции Н относятся материалы на основе щепаной слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистая изоляция проводов, стеклолакоткани и стеклолакочулки, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов, пластические массы с неорганическим наполнителем, асбестоцемент, кремнийорганические эластомеры без подложек и с неорганическими подложками, асбестовые пряжа, бумага и ткани.

При производстве материалов класса нагревостойкости Н для пропитки применяются кремнийорганические лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции С относятся слюда, стекло бесщелочное и стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, асбестоцемент, шифер электротехнический, материалы из щепаной слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой,

микалекс, политетрафторэтилен, полиимиды.

Приведенная выше классификация электроизоляционных материалов является ориентировочной и уточняется по мере накопления опытных данных. Перечисленные материалы не исчерпывают всего многообразия материалов, применяемых в электромашиностроении в связи с новыми разработками.

Влагостойкие, тропические, химостойкие, холодостойкие и коррозионно-стойкие исполнения электрических машин предъявляют дополнительные требования к изоляции.

Выбор изоляции определяется заданием на проектирование и технологией, принятой заводом — изготовителем электрической машины.

Ниже приводятся основные данные по наиболее ходовым электроизоляционным материалам (подробные данные приведены в [36]).

Электротехнические бумаги и картоны получают из химически обработанных волокон древесины и хлопка и предназначены они для работы на воздухе и в масле. Электроизоляционную бумагу выпускают в рулонах, а картоны — в рулонах (до толщины 0,8 мм) и в листах (при толщине свыше 1 мм). Фибра — прессованная бумага, обработанная раствором хлористого цинка, поддается всем видам механической обработки и штамповки.

К слоистым электроизоляционным материалам относятся гетинаксы, текстолиты и стеклотекстолиты. В качестве связующих применяют бакелитовые и кремнийорганические смолы. В гетинаксах в качестве наполнителей применяют специальные сорта бумаги, а хлопчатобумажные ткани используются в качестве наполнителей в текстолитах. Наполнителем в стеклотекстолитах являются бесщелочные стеклянные ткани. Наибольшей нагревостойкостью и хорошими электрическими характеристиками обладают стеклотекстолиты на кремнийорганических связующих.

Гетинакс и текстолит всех марок работает длительно при температурах в диапазоне —60÷+105° С, стеклотекстолит от —60 до +130° С, а стеклотекстолит марки СТК от —60 до +180° С.

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяют пропиточные компаунды и лаки, которые обеспечивают цементацию витков, увеличивают коэффициент теплопроводности и повышают влагостойкость обмоток.

Покровные лаки обеспечивают влагостойкость, маслостойкость, защиту от агрессивных веществ обмоток и других частей электрических машин. По способу сушки лаки делятся на лаки печной и воздушной сушки. Первые отвердевают при температуре 80—180° С, а вторые высыхают при комнатной температуре.

Лакоткани имеют тканевую основу, пропитанную лаком или другим жидким электроизоляционным составом. Лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклолакоткани). Наибольшую гибкость и толщину имеют шелковые и капроновые лакоткани. Наименьшей гибкостью обладают стеклолакоткани. Жесткие лакоткани применяют для пазовой и межслоевой изоляции. Фторопластовые стеклолакоткани негорючи, химостойки и могут работать при 250° С. Липкие лакоткани обеспечивают монолитность многослойной изоляции обмоток. Лакоткани выпускают в рулонах шириной 500—1000 мм, липкие стеклоленты — в роликах диаметром 150—175 мм и шириной 10, 15, 20, 25 и 30 мм.

Перспективными электроизоляционными материалами являются пленочные материалы толщиной от 10 до 200 мкм. Они обеспечивают лучший коэффициент заполнения паза, что приводит к снижению массы на единицу мощности в электрических машинах. В табл. 2-4 приведены основные данные пленочных электроизоляционных материалов.

Клееные электроизоляционные материалы на основе слюды применяют в высоковольтных машинах, а также в низковольтных машинах с классом изоляции Н. К этим мате-

Таблица 2-4

Пленочные электроизоляционные материалы

Материал пленки	Плотность, кг/м³	Нагревостойкость, °С	Относительное удлинение, %	Дополнительные данные
Полистирольные (стироплепки)	1050—1060	75—80	3,1—5,0	Растворяются в бензоле при комнатной температуре
Полиэтиленовые	920—930	65—75	250—500	Повышенная механическая прочность
Фторопласт-4	2100—2300	250	30—100	Не растворяется и не горит
Лавсан	1300—1400	120—130	70—100	Обладает большим сопротивлением надрыву
Фторопласт-3	2100—2400	100—120	40—80	Не горит. Растворяется в неполярных растворителях (бензин, четыреххлористый углерод и т. п.) при 100 °С
Поливинилхлоридные	1400	65—75	10—120	Гибкие, стойкие к маслам, растворителям, озону
Триацетатцеллюлозные	1250	120	12—15	Повышенное влагопоглощение
Полиамидные (капрон)	1150	105	350—500	Большое сопротивление надрыву
Полиимидные	1420	220	70—80	Стойкость к ионизирующим излучениям

риалам относятся миканиты, микафолий и микаленты. Миканиты бывают коллекторные, прокладочные, формовочные и гибкие.

Коллекторный миканит используют при изготовлении коллекторов для изоляции между коллекторными пластинами. Прокладочный миканит — твердый листовой материал, применяемый для изготовления прокладок. Из формовочного миканита путем горячего прессования изготовляются коллекторные манжеты, корпуса, каркасы катушек и другие изделия фасонного профиля. Гибкий миканит — листовой материал, обладающий гибкостью при комнатной температуре, используют в качестве пазовой изоляции.

Микафолий состоит из слоев листочков щепаной слюды, склеенных друг с другом и с бумагой или со стеклотканью. Применяют для получения твердой изоляции.

Микалента — рулонный электроизоляционный материал, гибкий при комнатной температуре. Микашелк — одна из разновидностей микаленты, имеющая повышенную механическую прочность. Повышенную нагревостойкость имеют стекло-микаленты. В последнее время широко применяют стеклобандажные ленты.

Микалекс — неорганическая пластмасса на основе молотой слюды и легкоплавкого стекла, стойкая к дуге и имеющая хорошие механические свойства. Выпускается в виде листов, пластин и прутков. Применяется в электроизоляционных конструктивных механически нагруженных деталях (траверсы, распорки, щитки и т. д.).

В слюдинитах и слюдопластах используются отходы слюды. Номенклатура слюдинитовых электроизоляционных материалов та же, что и материалов на основе щепаной слюды.

К электрокерамическим материалам относятся фарфор, стеатит и другие.

Слюдиниты и слюдопласты являются заменителями слюды и широко применяются в качестве изоляционных материалов в электромашиностроении.

В слюдинитах основой являются слюдинитовые бумаги, которые получаются из отходов слюды при равномерном ее нагреве до 700—800° С с последующей химической обработкой. Из слюдинитовых бумаг изготавливаются слюдинитовые ленты, гибкие слюдиниты, формовочный и коллекторный слюдинит.

Слюдопластовые материалы изготавливаются из листов, полученных из расщепленной слюды и многократного прокатывания чешуек между валками. В процессе изготовления слюдопластовых листов чешуйки срастаются, образуя более крупные чешуйки слюды, чем в слюдините.

Слюдопластовые материалы выпускаются в том же ассортименте, что и слюдиниты.

2-4. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Медные и алюминиевые обмоточные провода выпускают круглых и прямоугольных сечений. Изоляция проводов определяет принадлежность проводов к тому или иному классу нагревостойкости.

Круглые медные эмалированные провода широко применяют в элек-

Таблица 2-5

Классификация, нагревостойкость и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов

Марка провода	Класс нагревостойкости изоляции	Тип эмалевой изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции, мм
ПЭЛ	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,063—2,50	0,010—0,065
ПЭВ-1	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацеталевой основе	0,063—0,05 0,063—2,50	0,01—0,02 0,20—0,085
ПЭВ-2	А	То же с утолщенной изоляцией	0,063—2,50	0,025—0,090
ПЭМ-1	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацеталевой (поливинилформалевой) основе	0,063—2,50	0,02—0,08
ПЭМ-2	А	То же с утолщенной изоляцией	0,063—2,50	0,025—0,085
ПЭВД и ПЭВДБ	А	Поливинилацеталевая эмаль с дополнительным термопластичным слоем на основе соответственно поливинилацетата или поливинилбутираля	0,063—1,00	0,033—0,085
ПЭЛР-1	А	Высокопрочная эмаль на полиамиднорезольной основе	0,1—2,50	0,02—0,08
ПЭЛР-2	А	То же с утолщенной изоляцией	0,1—2,50	0,025—0,09
ПЭВТЛ-1	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,063—1,60	0,015—0,07
ПЭВТЛ-2	Е	То же с утолщенной изоляцией	0,063—1,60	0,02—0,08
ПЭВТЛК	Е	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,063—0,35	0,03—0,05
ПЭТВ-943	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063—2,50	0,025—0,09
ПЭТВ-939	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063—2,50	0,025—0,09
ПЭТВД	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе, с дополнительным слоем термопластичной смолы	0,063—0,365	0,037—0,065
ПЭТ-155А	F	Высокопрочная эмаль на полиэфиримидной основе	0,063—2,50	0,025—0,09
ПНЭТ-имид	До 200° С	Высокопрочная эмаль на полимидной основе (никелированная медная проволока)	0,10—1,32	0,025—0,06
ПЭТ-имид	То же	То же на голой медной проволоке	0,10—1,32	0,025—0,06

Таблица 2-6

Ассортимент и расчетные размеры медных эмалированных проводов

Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетные наружные диаметры, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-155А, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТ-имид, ПЭТВ-939, ПЭТВ-943
0,02	0,03	0,03	—
0,025	0,035	0,035	—
0,032	0,04	0,042	—
0,04	0,05	0,052	—
0,05	0,062	0,07	—
0,06	0,072	0,083	0,087
0,07	0,082	0,093	0,097
0,08	0,092	0,103	0,107
0,09	0,102	0,113	0,117
0,10	0,115	0,123	0,127
0,112	0,135	0,143	0,147
0,125	0,140	0,148	0,153
0,132	0,147	0,155	0,159
0,14	0,155	0,163	0,167
0,15	0,168	0,177	0,180
0,16	0,178	0,187	0,190
0,17	0,188	0,197	0,200
0,18	0,198	0,207	0,210
0,19	0,208	0,217	0,220
0,20	0,222	0,227	0,230
0,212	0,234	0,239	0,242
0,224	0,246	0,251	0,254
0,236	0,258	0,266	0,271
0,25	0,272	0,28	0,285
0,265	0,291	0,295	0,30
0,28	0,306	0,31	0,315
0,30	0,326	0,33	0,335
0,315	0,345	0,345	0,350
0,335	0,365	0,365	0,370
0,355	0,385	0,385	0,395
0,375	0,405	0,405	0,415
0,40	0,435	0,43	0,44
0,425	0,460	0,455	0,465
0,45	0,485	0,48	0,49
0,475	0,510	0,505	0,515
0,50	0,54	0,545	0,555
0,53	0,57	0,575	0,585
0,56	0,60	0,605	0,615
0,60	0,64	0,645	0,655
0,63	0,67	0,675	0,685
0,67	0,71	0,715	0,730
0,71	0,76	0,755	0,770
0,75	0,80	0,80	0,815
0,85	0,90	0,90	0,915
0,90	0,95	0,95	0,965
0,95	1,00	1,00	1,015
1,00	1,06	1,07	1,08
1,06	1,12	1,13	1,14
1,12	1,18	1,19	1,20
1,18	1,24	1,25	1,16
1,25	1,31	1,32	1,33

Продолжение табл. 2-6

Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетные наружные диаметры, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-155А, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТ-имид, ПЭТВ-939, ПЭТВ-943
1,32	1,38	1,39	1,40
1,40	1,465	1,47	1,48
1,50	1,565	1,57	1,58
1,60	1,665	1,67	1,68
1,70	1,765	1,77	1,78
1,80	1,865	1,875	1,88
1,90	1,965	1,975	1,98
2,00	2,065	2,075	2,08
2,12	2,185	2,205	2,21
2,24	2,305	2,325	2,33
2,36	2,425	2,445	2,45
2,50	2,565	2,585	2,59

тромашиностроении. Они имеют небольшую толщину изоляции, в 1,5—2,5 раза меньшую, чем у проводов с покрытием эмалью и хлопчатобумажной или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза.

В табл. 2-5 приведены основные данные медных эмалированных проводов, а в табл. 2-6 — их ассортимент и размеры.

Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные винифлексовой изоляцией, и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ, эмалированные полиэтилентерефталатными лаками.

Провода марок ПЭТВ-943 и ПЭТВ-939 длительно работают при температуре 130° С.

К эмалированным проводам повышенной нагревостойкости относятся провода марок ПНЭТ-имид, ПЭТ-имид с применением полиимидных лаков.

Выпускаются также эмалированные прямоугольные провода ПЭТВП и ПНЭТП.

Эмалированные провода ПЭЛ изготавливают с минимальными диаметрами 0,02—0,04 мм.

Провода марок ПЭВД и ПЭВДБ имеют клеящий слой, позволяющий без пропитки склеивать витки в секции.

Таблица 2-7

Обмоточные медные провода с изоляцией из хлопчатобумажной пряжи, натурального шелка, синтетических волокон и пленок

Наименование обмоточных проводов	Марка провода	Класс нагревостойкости	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции для круглых и прямоугольных проводов, мм
Провод, изолированный двумя слоями обмотки из хлопчатобумажной ткани	ПБД	А	Круглые диаметром 0,40—2,5 Прямоугольные (0,9—5,6)× ×(2,12—15)	0,22—0,33 0,27—0,44
Провод, изолированный эмалью на масляно-смоляной основе и одним слоем обмотки из натурального шелка	ПЭЛШО	А	Круглые диаметром 0,05—1,56	0,08—0,16
Провод, изолированный эмалью на масляно-смоляной основе и одним слоем обмотки из лавсанового волокна	ПЭЛЛО	А	Круглые диаметром 0,063—1,32	0,08—0,14
Провод, изолированный высокопрочной эмалью (винифлекс или металвин) и одним слоем обмотки из лавсанового волокна	ПЭВЛО	А	Круглые диаметром 0,063—1,32	0,09—0,17
Провод, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости и одним слоем обмотки из лавсанового волокна	ПЭТЛО	В	Круглые диаметром 0,20—1,32	0,12—0,18
Провод, изолированный высокопрочной эмалью повышенной нагревостойкости (лудящийся) и одним слоем обмотки из лавсанового волокна	ПЭПЛО	Е	Круглые диаметром 0,20—1,32	0,12—0,18
Провод, изолированный двумя слоями обмотки из лавсанового волокна	ПЛД	Е	Круглые диаметром 0,315—1,32	0,18—0,2
Провод, изолированный одним слоем обмотки из лавсанового волокна и одним слоем обмотки из хлопчатобумажной пряжи	ПЛБД	А	Круглые диаметром 0,40—2,6 Прямоугольные (0,9—5,6)× ×(2,12—12,5)	0,2—0,28 0,27—0,36
Провод, изолированный двумя слоями обмотки триацетатной пленкой, одним слоем обмотки телефонной бумагой и однослойной обмоткой из хлопчатобумажной пряжи	ППТБО	А	Прямоугольные (0,9—5,6)× ×(2,1—12,5)	0,38—0,53

Таблица 2-3

Ассортимент медных обмоточных проводов со стекловолокнистой изоляцией

Наименование обмоточного провода	Марка провода	Класс нагревостойкости	Номинальные размеры проводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции, мм	Пробивное напряжение, В
Провод, изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	ПСД	F	Круглые диаметром 0,315—2,6 Прямоугольные (0,9—5,6)× ×(2,1—12,5)	0,23—0,33 0,27—0,4 0,32—0,38	450—650 550—650
Провод, изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	ПСДК	H	То же	0,23—0,33 0,27—0,4 0,32—0,38	450—650 550—650
Провод, изолированный двухслойной обмоткой утоненным стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	ПСДТ	F	Круглые диаметром 0,315—2,12	0,18—0,23	350—450
Провод, изолированный двухслойной обмоткой утоненным (трехмикронным) стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя кремнийорганическим лаком	ПСДКТ	H	Круглые диаметром 0,315—2,12 Прямоугольные (0,9—3,55)× ×(2,12—10)	0,14—0,22 0,22 0,26—0,32	300—450 450
Провод, изолированный слоем кремнийорганической эмали и однослойной обмоткой утоненным (трехмикронным) стекловолокном с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	ПЭТКСОТ	H	Круглые диаметром 0,30—1,60 Прямоугольные (0,85—1,40)× ×(2,12—4,75)	0,14—0,16 0,20—0,22 0,18—0,2	350 350
Провод, изолированный слоем блок-полимерной кремнийорганической эмали и однослойной обмоткой утоненным стекловолокном с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	ПНЭТКСОТ	200° С в течение 10 000 ч, при допущении кратковременного нагрева (до 50 ч) до 300°С	Круглые диаметром 0,20 и 0,315	0,12—0,14	350—400
Провод с алюминиевой жилой, изолированный двухслойной обмоткой стекловолокном с подклейкой и пропиткой каждого слоя нагревостойким лаком	АПСД	F	Круглые диаметром 1,60—2,50 Прямоугольные (2,12—5,6)× ×(4,0—14,0)	0,27 0,32—0,48	550 550

Алюминиевые эмалированные провода изготавливаются диаметром 0,08—0,41 мм марок ПЭВАТ — с неотожженной и ПЭВА — с отожженной алюминиевой проволокой. Эти провода относятся к классу А. Провода ПЭТВА принадлежат к классу нагревостойкости В.

При механизированной укладке обмоток на обмоточных станках применяют провода круглого сечения с изоляцией, имеющей повышенную механическую прочность (марки ПЭТВМ класса нагревостойкости В и марки ПЭТМ класса F).

Классификация медных и алюминиевых обмоточных проводов с эмалеволокнистой, бумажной и пленочной изоляцией приведена в табл 2-7.

Данные проводов со стекловолокнистой изоляцией представлены в табл. 2-8.

К обмоточным проводам высокой нагревостойкости относятся провода марок ПНСДК и ПНСДКТ. В зависимости от температуры срок службы этих проводов изменяется. Так, при 250° С срок службы равен 15—20 тыс. ч, а при 400° С он снижается до 200—500 ч.

Провода со стекловолокнистой изоляцией марки ПОЖ можно длительно эксплуатировать при 300° С. Выпускают провода ПЭЛБ-700 с биметаллической жилой серебро — никель для длительной эксплуатации при 500° С.

Для пайки проводников применяют припои. Припои делятся на мягкие и твердые. Наибольшее применение получили оловянно-свинцовые припои ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50, ПОС-40, ПОС-30, ПОС-18. Цифры обозначают процентное содержание олова.

Мягкие припои заменяются медно-фосфористыми припоями марок ПМФ-7 и ПМФ-9. Цифрами обозначается содержание фосфора.

Серебряные припои ПСр-71 (71% серебра, 28% меди и 1% фосфора) обеспечивают прочность спаев, превосходящую прочность меди. Серебряные припои применяют в специальных электрических машинах, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

2-5. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Кроме активных материалов (магнитопроводы, обмотки и изоляция) есть конструкционные материалы, которые применяют для изготовления частей машины, несущих механические нагрузки и обеспечивающих соединение машины в единое целое. Конструкционные материалы можно разделить на три группы: черные, цветные металлы и пластмассы.

Черные металлы широко применяют в электромашиностроении. К ним относятся литая сталь, серый чугун, ковкий чугун и различные сорта и профили прокатных сталей. Литую сталь в электрических машинах применяют для изготовления частей машины, выполняющих одновременно роль конструкционных частей и части магнитопровода, где замыкается постоянный поток. В машинах постоянного тока это станина, основные и добавочные полюсы. В неявнополюсных синхронных машинах — бочка ротора, а в явнополюсных — полюсы индуктора и индуктор (обод ротора).

Литая сталь применяется также для изготовления деталей с высокими механическими напряжениями — втулок коллектора, подшипниковых щитов тяговых и взрывозащищенных машин. Изготовление деталей из литья связано с большой трудоемкостью, поэтому там, где это допустимо, литую сталь заменяют сварными деталями из листовой стали. В электромашиностроении применяют литую сталь марок 20Л, 35Л, 45Л (ГОСТ 977-75).

Серый чугун марок СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-20, СЧ28-48 (ГОСТ 1412-70) применяют для изготовления станин асинхронных и синхронных машин и подшипниковых щитов.

Из ковкого чугуна (ГОСТ 1215-59) изготавливают путем отливки станины, втулки, подшипниковые щиты, нажимные шайбы, маховики, шкивы и полумуфты.

Преимущество ковкого чугуна по сравнению с серым чугуном в его пластичности и высокой износостойкости.

Сталь прокатную выпускают в широком сортаменте. В основном в электромашиностроении применяют круглую, листовую, шестигранную и квадратную сталь.

Сталь круглую (ГОСТ 2590-71 и 7417-75) применяют для изготовления валов, втулок, шестерен и других деталей.

Сталь шестигранную (ГОСТ 8560-78) применяют для изготовления деталей, имеющих шестигранную часть: болтов, гаек и других деталей. Крупные болты изготавливают из круглой стали с высадкой шестигранной головки.

Сталь квадратная (ГОСТ 2591-71 и 8559-75) идет на изготовление стержней, пальцев щеткодержателей и других деталей.

Сталь листовую (ГОСТ 19903-74 и 19904-74) применяют для изготовления листов полюсов машин постоянного и переменного тока, фундаментных плит, стояков подшипников и многих других деталей (диффузоров, распорок, скоб и т. п.).

Жесть белую холоднокатаную горячего лужения и ленточную толщиной 0,18—0,5 мм, покрытую с обеих сторон слоем олова, применяют при изготовлении бандажей, скрепок, табличек. Она хорошо штампуется и устойчива против коррозии.

Углеродистую стальную холоднотянутую проволоку применяют для изготовления пружин щеткодержателей, запоров крышек и других деталей.

Проволоку стальную луженую бандажную выпускают немагнитной (класс Н) и магнитной (класс М). Применяют для изготовления бандажей обмоток асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Диаметр проволоки 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

Из цветных металлов в качестве конструкционных материалов наибольшее применение в электромашиностроении находят алюминий и его сплавы с медью и оловом.

Алюминиевые литые сплавы (ГОСТ 2685-75) применяют для изготовления корпусов, подшипниковых щитов, вентиляторов и других деталей электрических машин. Детали из алюминиевого литья легче чугунных и стальных и могут изготавливаться более прогрессивными способами. Недостаток деталей из алюминия — ненадежность резьбы, что вызывает необходимость армирования втулками. Ал2 — алюминиево-кремнистый сплав, применяется для изготовления деталей сложной формы. Ал9 — сплав с добавкой магния, применяется для изготовления деталей сложной формы и требующих высокой герметичности. Ал11 — алюминиево-кремнисто-цинковый сплав, применяется для изготовления крупных деталей сложной формы, несущих большие статические нагрузки. Детали из этих сплавов отличаются в кокиль, под давлением и в земляные формы.

Литые сплавы с содержанием меди — латуни применяются для отливки щеткодержателей и других токоведущих деталей. ЛС59-1Л — латунь свинцовистая. ЛС80-3Л — латунь кремнистая. Отливаются центробежным способом и по выплавляемым моделям.

В электромашиностроении находит большое применение сортовой прокат цветных металлов. Это латунь Л62 и латунь свинцовистая ЛС59-1. Поставляются в виде проволоки, лент, листов и прутков круглого, квадратного и шестигранного сечения. Применяются для изготовления деталей ковкой, штамповкой и механической обработкой.

Бронзу БрОЦС — оловянисто-цинково-свинцовую применяют для деталей, работающих на трение (втулки, вкладыши, червячные колеса).

Баббиты БКА, БК2, Б-89, Б-83, Б-16, Б-6, БН и ВГ применяют для заливки втулок, сегментов и вкладышей подшипников скольжения

В качестве конструкционных материалов в электрических машинах достаточно широко применяются пластмассы. Из термореактивных пластмасс изготовляют колодки зажимов, изоляционные втулки и другие детали. Широко применяются опрессованные детали (щеточные пальцы, траверсы и другие детали), Возможности применения пластмасс в электромашиностроении далеко еще не исчерпаны.

Глава третья

ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ

3-1. ВИДЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

По своей конструкции обмотки машин переменного тока разделяются на всыпные из мягких катушек, обмотки из полужестких и жестких катушек и стержневые обмотки статоров крупных машин и фазных роторов асинхронных двигателей.

Всыпная обмотка укладывается в полузакрытые пазы, имеющие узкий шлиц, через который поочередно каждый из проводников катушки опускают («всыпают») в паз (отсюда и название обмотки).

При машинной укладке в зависимости от типа обмоточных станков каждый из витков обмотки либо укладывают непосредственно в паз без предварительной намотки заготовок, либо наматывают заготовки нескольких катушек, а затем втягивают их с торца машины в нужные пазы. Эти операции осуществляются на автоматических или полуавтоматических обмоточных станках.

Наибольший диаметр провода, применяемый для всыпных обмоток, не превышает 1,80 мм, так как провода большего диаметра имеют слишком большую жесткость и плохо уплотняются в пазах во время укладки. Нужное сечение эффективного проводника обеспечивается выполнением обмотки из нескольких элементарных проводников.

При проектировании машин для уменьшения необходимого числа элементарных проводников выбирают обмотку с несколькими параллельными ветвями.

Конструкция изоляции всыпной обмотки (многослойная изоляция паза) не обеспечивает электрической прочности при напряжениях выше 660 В, а малая механическая прочность катушек, особенно их лобовых частей, не позволяет применять всыпную обмотку в машинах мощностью более 100 кВт, так как при динамических процессах броски тока в таких машинах вызывают большие ударные нагрузки на обмотку. Поэтому всыпная обмотка применяется в машинах мощностью до 100 кВт при номинальном напряжении до 660 В.

Обмотки из полужестких и жестких катушек. В машинах мощностью более 100 кВт для придания катушкам большей механической прочности их выполняют из прямоугольного обмоточного провода. Катушки наматывают на фигурных шаблонах и уже до укладки в пазы придают им окончательную форму. После укладки лобовые части соседних катушек связывают между собой, а при больших вылетах лобовых частей закрепляют к бандажным кольцам (см. гл. 9).

Упорядоченное расположение лобовых частей катушек позволяет создать с помощью различных прокладок и бандажей жесткую систему, выдерживающую большие ударные механические нагрузки. При этом обеспечивается возможность прохода охлаждающего воздуха между лобовыми частями соседних катушек, что существенно улучшает условия охлаждения по сравнению со всыпной обмоткой. При высоких номинальных напряжениях (3 кВ и выше) или в машинах специальных исполнений (влагостойком, химостойком, тропическом и др.) при любых напряжениях катушки имеют непрерывную или гильзовую изоляцию и укладываются в открытые прямоугольные пазы. Такую обмотку называют обмоткой из жестких катушек. Катушки наматываются из прямоугольных проводов, площадь сечения которых не превышает 17—20 мм², так как при бóльших сечениях в проводниках обмотки значительно увеличиваются потери от вихревых токов.

Чтобы уменьшить влияние эффекта вытеснения тока на равномерность распределения плотности тока в каждом из проводников, их располагают в пазу плашмя, широкой стороной сечения параллельно дну паза. Если требуемое сечение витка

превышает 20 мм², то эффективный проводник образуют из двух или, реже, из четырех элементарных проводников.

В катушках, намотанных из двух элементарных проводников, они располагаются рядом на одной высоте (рис. 3-1, *а*), чтобы их индуктивное сопротивление было одинаково. Взаимное расположение четырех элементарных проводников показано на рис. 3-1, *б*. Такая конструкция применяется только в тех случаях, когда сечение эффективного проводника превышает 40 мм² даже при максимально возможном числе параллельных ветвей в обмотке.

Если номинальное напряжение машины мощностью более 100 кВт не превышает 660 В и к ее изоляции не предъявляются какие-либо специальные требования, то применяют так называемую полужесткую обмотку. Катушки такой обмотки также наматывают из прямоугольного провода, но корпусная изоляция имеет конструкцию, принятую во всыпной обмотке, т. е. изолируют не катушки, а пазы машины. Отсутствие корпусной изоляции катушек позволяет сделать их подразделенными (по ширине паза располагаются по две катушки в каждом слое) с тем, чтобы уменьшить ширину шлица паза. Такие пазы называют полуоткрытыми. Последовательность укладки подразделенных катушек (их часто называют полукатушками, а обмотку — подразделенной) в полуоткрытые пазы машины показана на рис. 3-2. В такой обмотке изоляции между соседними по ширине паза катушками отсутствует, поэтому их соединяют между собой только параллельно, чтобы напряжение между двумя лежащими рядом по ширине паза проводниками различных катушек было равно нулю. Такие проводники являются как бы двумя элементарными проводниками, образующими один эффективный.

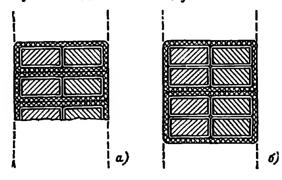


Рис. 3-1. Взаимное расположение элементарных проводников в катушке.

а — при $n_{эл}=2$; *б* — при $n_{эл}=4$.

Таким образом, обмотки из полужестких катушек применяют в машинах мощностью более 100 кВт с номинальным напряжением не выше 660 В; обмотку из жестких катушек применяют во всех машинах с напряжением 3 кВ и выше или при специальных требованиях, при которых изоляция обмоток должна быть непрерывной или гильзовой.

Из жестких катушек выполняют также обмотки фазных роторов асинхронных двигателей небольшой мощности.

Стержневые обмотки. Отдельным элементом стержневой обмотки является не катушка, как в ранее рассмотренных типах обмоток, а стержень, представляющий собой как бы половину катушки: одну пазовую часть и две половины лобовых (рис. 3-3). Стержни укладываются в пазы поочередно и только после укладки соединяются между собой в лобовых частях, образуя витки обмотки. Стержневая обмотка может быть выполнена по схеме как петлевой, так и волновой. В зависимости от этого меняется направление отгиба лобовых частей стержня. С точки зрения электромагнитного расчета стержневая обмотка идентична катушечной с одним витком в каждой катушке, но имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что в двухслойной стержневой обмотке число эффективных проводников в пазу всегда равно двум ($u_п=2$). При этом сечение стержня может быть выполнено значительно бóльшим, чем сечение эффективного проводника в обмотке с многовитковыми катушками. В то же время число витков в фазе такой обмотки $W=Z/ma$ (m — число фаз, Z — число пазов, a — число параллельных ветвей) и в трехфазных машинах не может быть более $Z/3$. Эти особенности (большое сечение эффективного проводника и малое число витков в фазе) опреде-

ляют область применения стержневых обмоток: статорные обмотки крупных электрических машин и фазные обмотки роторов асинхронных двигателей средней и большой мощности.

17—20 мм². Суммарное сечение всех элементарных проводников, составляющих один стержень, равно сечению эффективного проводника-стержня. Для уменьшения действия эффекта вытеснения тока элементарные

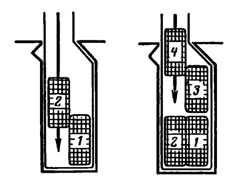


Рис. 3-2. Последовательность укладки подразделенных катушек в полуоткрытые пазы катушек (показана пунктиром).

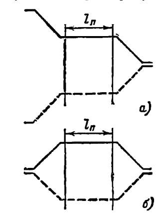


Рис. 3-3. Схематическое изображение стержней обмотки.

а — волновой; *б* — петлевой.

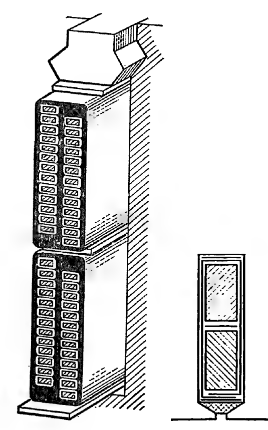


Рис. 3-4. Стержни высоковольтной обмотки в пазу статора.

Рис. 3-5. Расположение стержней в пазу фазного ротора асинхронной машины.

Стержневую обмотку на статорах применяют в основном в мощных синхронных турбо- и гидрогенераторах, однако необходимость ее выполнения может возникнуть и при проектировании синхронных или асинхронных машин мощностью в несколько тысяч киловатт, т. е. в машинах с большими номинальными токами и большим потоком.

В обмотках статоров машин переменного тока протекает ток промышленной частоты, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи стержни выполняют не из массивных медных шин, а из многих изолированных между собой параллельных проводников, которые называют элементарными (рис. 3-4). Сечение каждого элементарного проводника не должно превышать

проводники при сборке стержня переплетают определенным образом, так чтобы каждый из них на протяжении пазовой части занимал попеременно все возможные положения по высоте стержня. Такое переплетение называют транспозицией. С расчетом и методами выполнения транспозиции можно ознакомиться в литературе по проектированию крупных машин переменного тока [31].

В роторах асинхронных двигателей частота тока в номинальном режиме обычно не превышает 1—2 Гц, поэтому стержни обмотки на элементарные проводники не подразделяют. Они выполняются из прямоугольной шинной меди (рис. 3-5).

Механическая жесткость стержней дает возможность выполнить пазы ротора полузакрытыми с узкой прорезью. Стержни вставляют в пазы ротора, поэтому до укладки у стержней изгибается только одна лобовая часть. Вторая лобовая часть изгибается после установки стержней на место.

При конструировании лобовых частей обмоток электрических машин необходимо предусматривать промежутки между лобовыми частями соседних катушек, обеспечивающие надежность изоляции и возможность прохода между ними охлаждающего воздуха, а также минимально допустимые расстояния между лобовыми частями обмотки и металлическими деталями машины (подшипниковыми щитами, корпусом и т. д.) и между лобовыми частями и межгрупповыми соединениями обмотки, которые изолируются после укладки катушек и в связи с этим имеют электрически менее прочную изоляцию, чем катушки обмотки.

Одно из наиболее уязвимых мест изоляции обмотки — это участки выхода катушки из паза на торцах машины, где напряженность электрического поля увеличивается, а изоляция катушек ослабляется из-за изгиба их лобовых частей. Для обеспечения необходимой электрической прочности место изгиба лобовых частей удаляется на некоторое расстояние от торца магнитопровода. Это расстояние зависит от типа обмоток и от номинального напряжения машины и должно быть учтено при расчете длины лобовой части и средней длины витка. Для усиления электрической прочности этого участка во всыпных и полужестких обмотках накладываются дополнительные слои изоляции в местах выхода катушек из пазов.

Короткозамкнутые обмотки широко распространены в роторах асинхронных двигателей и в роторах синхронных машин, где они играют роль демпферных (успокоительных) обмоток. Основное их отличие от всех остальных обмоток электрических машин заключается в отсутствии изоляции между пазовой частью обмотки и стенками паза. Встречающиеся иногда m-фазные изолированные и замкнутые накоротко обмотки роторов асинхронных машин специального исполнения здесь не рассматриваются.

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей, или, как их иногда называют, беличьи клетки, делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые (рис. 3-6).

В сварных конструкциях (рис. 3-6, *а*) стержни обмотки устанавливаются в пазы, после чего с торцов ротора их замыкают, приваривая или припаивая замыкающие кольца. При литых конструкциях одновременно заливаются как одно целое и стержни, и замыкающие кольца. На замыкающих кольцах отливаются также вентиляционные лопатки, выполняющие роль вентилятора при работе машины (рис. 3-6, *б*).

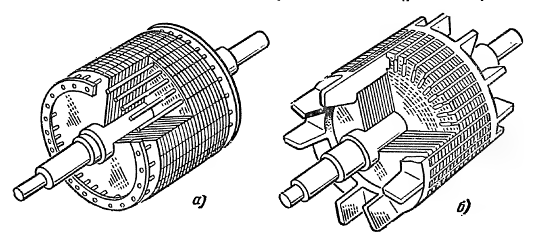


Рис. 3-6. Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей.
а — со сварной обмоткой; *б* — с литой обмоткой.

Замыкающие кольца могут располагаться непосредственно у торцов ротора — прилегать к ним либо отстоять от торцов на некоторое расстояние.

В роторах с литыми обмотками замыкающие кольца всегда прилегающие (рис. 3-7, *а, в*). При этом они помимо своей основной функции выполняют и другую задачу — удерживают в опрессованном состоянии листы сердечника ротора.

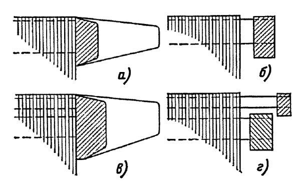


Рис. 3-7. Виды исполнений замыкающих колец короткозамкнутых роторов.

Замыкающие кольца одноклеточных роторов: *а* — с литой обмоткой; *б* — со сварной обмоткой; замыкающие кольца двухклеточных роторов; *в* — с литой обмоткой; *г* — со сварной обмоткой.

Замыкающие кольца в роторах со вставными стержнями располагают на некотором расстоянии от магнитопровода ротора, т. е. их выполняют отставленными (рис. 3-7, *б, г*).

Форма пазов и конструкция обмотки короткозамкнутых роторов определяются мощностью двигателя и требованиями к его пусковым характеристикам. В машинах мощностью до 50—60 кВт обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия (рис. 3-8, *а*). Размеры паза выбирают такими, чтобы зубцы ротора имели параллельные стенки. Круглые пазы (рис. 3-8, *б*), применявшиеся ранее в малых машинах, в настоящее время почти не применяют из-за получающейся большой неравномерности сечений зубцов.

Роторы более крупных машин с прямоугольными пазами выполняют с литой алюминиевой (рис. 3-8, *в*) или сварной медной обмоткой (рис. 3-8, *г*). Прямоугольные пазы иногда выполняют также в короткозамкнутых роторах многополюсных асинхронных двигателей, обмотка которых образована из алюминиевых шин прямоугольного сечения (рис. 3-8, *д*). Для увеличения пусковых моментов двигателей прямоугольные пазы делают узкими и глубокими, так как эффект вытеснения тока в них возрастает с увеличением высоты стержня. Роторы с такими пазами называют глубокопазными.

В асинхронных двигателях мощностью выше 100—120 кВт, особенно при небольшом числе полюсов, часто не удается получить требуемый пусковой момент даже при глубокопазных роторах, поэтому переходят к роторам с фигурными пазами. Применяют различные конфигурации пазов (рис. 3-8, *е—и*). Все они имеют общую характерную особенность — уменьшение ширины верхней части

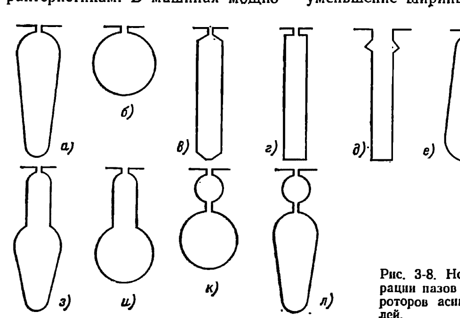


Рис. 3-8. Некоторые конфигурации пазов короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей.

паза по сравнению с нижней, что позволяет в большей степени использовать эффект вытеснения тока при больших скольжениях.

Короткозамкнутые обмотки роторов с пазами трапецеидальной формы выполняют как с заливкой пазов алюминием (рис. 3-8, *е*), так и со сварной медной клеткой (рис. 3-8, *ж*), для стержней которой используют шинную медь соответствующего профиля.

Обмотки со стержнями более сложной формы, например лопаточные стержни (рис. 3-8, *з*), выполняют заливкой алюминием или его сплавами. Колбообразные или бутылочные пазы (рис. 3-8, *и*) в настоящее время почти не применяют из-за менее удачного, чем при лопаточных пазах, использования стали зубцовой зоны.

Асинхронные двигатели, предназначенные для приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска, часто выполняют с двухклеточными роторами (рис. 3-8, *к*, *л*), в которых на каждом зубцовом делении размещены один над другим два стержня. Каждая система стержней образует свою обмотку: верхние стержни, лежащие ближе к зазору, — пусковую, а нижние — рабочую.

Двойная клетка может быть выполнена в двух вариантах: с общими замыкающими кольцами (см. рис. 3-7, *в*), когда каждое кольцо замыкает одновременно стержни и пусковой и рабочей клеток, либо с раздельными замыкающими кольцами (см. рис. 3-7, *г*). В последнем случае с каждого торца ротора располагают по два кольца, одно из которых замыкает только стержни пусковой, а другое — стержни рабочей клетки.

Обычное исполнение двойной клетки — сварное с раздельными кольцами (рис. 3-8, *к*). Рабочая обмотка (стержни и короткозамыкающие кольца) в большинстве случаев изготовляется из меди, а пусковая — из латуни. Латунь для пусковой клетки применяют из-за ее больших удельного сопротивления и теплоемкости по сравнению с медью.

Увеличение теплоемкости пусковой клетки особенно важно для машин с длительными тяжелыми пусками, за время которых выделенные в роторе потери могут нагреть пусковую обмотку до недопустимо высокой температуры.

В современных машинах распространено также двухклеточное исполнение роторов с литыми обмотками (рис. 3-8, *л*). В таких конструкциях и пусковую и рабочую клетки заливают одним металлом. Замыкающие кольца общие, прилегающие (см. рис. 3-7, *в*).

Демпферные обмотки синхронных машин выполняют только сварной конструкции. Стержни обмотки, в подавляющем большинстве случаев круглого сечения, располагают в пазах полюсных наконечников.

Демпферные обмотки синхронных двигателей более мощные, чем генераторов, так как их используют так же, как пусковые.

У генераторов демпферные обмотки выполняют из меди. В двигателях для улучшения пусковых характеристик часто применяют латунь. Короткозамыкающие кольца, как правило, отставленные.

3-2. ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В технологическом процессе изолирования и укладки обмоток в пазы машины их изоляция подвергается различным механическим воздействиям, а при работе машины также и нагреву, влиянию находящихся в окружающей среде влаги, пыли, паров масел, различных газов и т. п. В практике электромашиностроения не существует какого-либо одного вида электроизоляционного материала, который обеспечил бы надежность изоляции электрической машины при действии указанных выше факторов.

Изоляционные материалы, обладающие высоким электрическим сопротивлением, как правило, не имеют достаточной механической прочности и не выдерживают механических нагрузок при изготовлении и укладке обмоток. Стойкие к механическим воздействиям материалы не обладают достаточной электрической прочностью. Поэтому при конструировании электрической

изоляции применяют не один, а несколько различных материалов, свойства которых взаимно дополняют друг друга. Помимо электрической прочности изоляция должна обладать также хорошей теплопроводностью, так как в противном случае потери, выделяющиеся в токоведущих частях при работе электрической машины, вызовут увеличение их нагрева.

Основными требованиями, которые предъявляют к изоляции электрических машин, являются ее высокие электрическая прочность и теплопроводность. Остальные требования (механическая прочность, влагостойкость, нагревостойкость, химостойкость и пр.) предъявляют к изоляции только с точки зрения ее способности сохранить электрическую прочность в течение технологического процесса изготовления и при длительной эксплуатации электрических машин в заданных режимах и условиях.

На рис. 3-9 изображены поперечные сечения некоторых конфигу-

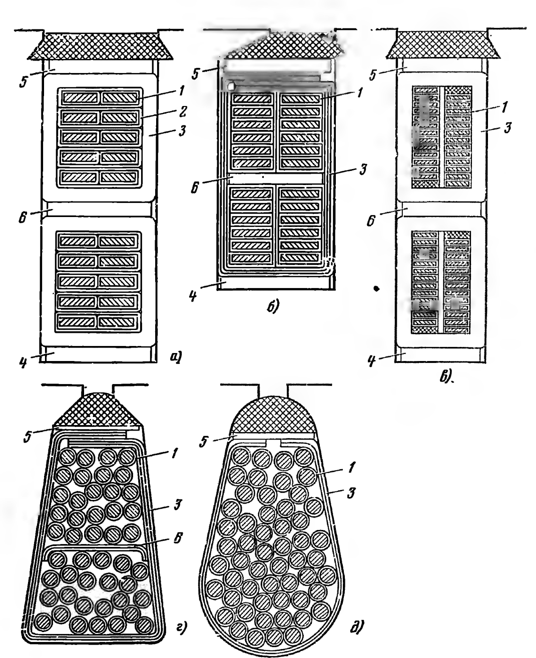


Рис. 3-9. Поперечные сечения пазов машин переменного тока, заполненных проводниками обмотки и изоляции.

а — открытые пазы с обмоткой из жестких катушек; *б* — полуоткрытые пазы с обмоткой из подразделенных катушек; *в* — открытые пазы со стержневой обмоткой крупных машин; *г* — пазы со всыпной двухслойной обмоткой; *д* — пазы со всыпной однослойной обмоткой.

раций пазов электрических машин, заполненных проводниками обмотки. В каждом из них условно показано расположение изоляции в пазу.

По своим функциям изоляция обмоток подразделяется на корпусную (пазовую), витковую и проводниковую.

Проводниковая изоляция *1* — это изоляция обмоточного провода.

Витковая изоляция *2* может быть установлена только в машинах с обмоткой из прямоугольного провода. Обычно ее устанавливают лишь в высоковольтных машинах. В низковольтных машинах нормального исполнения напряжение между витками небольшое и роль витковой изоляции выполняет изоляция обмоточного провода.

Корпусную изоляцию *3* накладывают либо на катушки обмотки (непрерывная или гильзовая изоляция, рис. 3-9, *а*, *в*), либо устанавливают в пазы машины до укладки обмоток (низковольтные машины со всыпной или полужесткой обмоткой, рис. 3-9, *б*, *г*, *д*).

В пазах электрических машин устанавливают несколько видов прокладок из листового материала, имеющих различное назначение. Прокладки *4* на дно пазов (рис. 3-9, *а*—*в*) несут функцию защиты корпусной изоляции от механических повреждений при заклиновке, связанных с возможной неровностью дна пазов. Прокладки *5* под клин (рис. 3-9) предназначены также для механической защиты обмоток от возможных повреждений при установке пазовых клиньев, и, кроме того, с помощью этих прокладок, меняя в определенных пределах их толщину, выбирают допуск на укладку обмотки по высоте паза, добиваясь прочного закрепления катушек в пазах.

Прокладки *6* между слоями во всыпных и полужестких обмотках (рис. 3-9, *б*, *г*) создают изоляционную прослойку между проводниками верхнего и нижнего слоев.

В обмотках с непрерывной или гильзовой изоляцией прокладки между слоями (рис. 3-9, *а*, *в*) несут другую функцию. Они обеспечивают определенное постоянное расстояние по высоте между пазовыми частями катушек верхнего и нижнего слоев с целью компенсировать утолщение изоляции в лобовых частях, где она не может быть опрессована при изготовлении катушек, и предотвратить возможность взаимного касания катушек разных фаз при перекрещивании лобовых частей.

Примеры конструкции изоляции высоковольтных машин приведены в табл. 3-1—3-4.

Корпусную высоковольтную изоляцию выполняют гильзовой или непрерывной.

Гильзовую изоляцию (табл. 3-1) образуют путем намотки на прямолинейную пазовую часть катушки нескольких слоев листового микафолия или стекломикафолия и последующей его опрессовки и выпечки. Лобовые части катушек изолируют ленточным материалом — микалентой или стекломикалентой. Микафолиевая изоляция по своим свойствам относится к термореактивной, т. е. после выпечки и последующего охлаждения она приобретает большую механическую прочность и не размягчается при повторном нагревании. В зависимости от применяемых материалов и связующих лаков гильзовая изоляция может быть выполнена на различные классы нагревостойкости.

Гильзовая изоляция имеет высокое пробивное напряжение и широко применялась для изоляции статорных обмоток высоковольтных машин. Основным ее недостатком является наличие слабого в электрическом отношении звена — места стыка двух видов изоляции: гильзовой на пазовой части и непрерывной ленточной на лобовой. Этот участок находится непосредственно у выхода прямолинейной части катушек из пазов, т. е. в месте наибольшей напряженности электрического поля (вблизи угла поверхности магнитопровода). Этот же участок испытывает наибольшие деформации как при укладке обмотки, так и при работе машины, так как жесткость лобовых частей намного меньше, чем пазовых, заключенных в изоляционную гильзу. Поэтому

Таблица 3-1

Гильзовая изоляция класса F статорных обмоток переменного тока мощностью от 100 до 1000 кВт на напряжение 3000—3300 В

Часть обмотки	Позиция	Материал			Число слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	1	Изоляция проводника	—	—	—		—	—
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	3	Стекломикафолий	МФП-Т	0,2	6,5 оборотов		2,6	2,6
		Толщина изоляции катушки	—	—	—	—	2,8	2,8
		Допустимые отклонения	—	—	—	—	±0,4	+0,6 −1,2
	4	Стеклолакоткань	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	6	Стеклотекстолит	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	7	Стеклотекстолит	СТЭФ	1,0	—	1	—	1,0
		Допуск на укладку	—	—	—	—	0,5	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	—	3,6	8,6
Лобовая	8	Стеклянная лента	АЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	9	Стекломикалента	ЛФЭ-ТТ	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
	10	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
		Разбухание от пропитки	—	—	—	—	0,5	0,5
		Толщина изоляции катушки	—	—	—	—	3,7	3,7
		Допустимые отклонения	—	—	—	—	±0,5	±1,0
Выводные концы		Стекломикалента	ЛФЭ-ТТ	0,13	4 слоя вполнахлеста		—	—
		Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста		—	—

увеличивается опасность пробоя изоляции в этом месте.

Недостатком гильзовой изоляции является также и малая монолитность изоляции лобовых частей, ухудшающая ее влагостойкость.

Непрерывная изоляция (табл. 3-2) образуется намоткой нескольких слоев ленточного изоляционного материала непрерывно по всей длине катушки и последующим компаундированием или пропиткой. Наибольшее распространение имеет изоляция, выполненная намоткой слоев микаленты или стекломикаленты и пропитанная в битумных

Таблица 3-2

Непрерывная изоляция класса В катушек статорных обмоток машин переменного тока на напряжение до 10 000 В

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование	Материал: Толщина, мм	Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм: по ширине	Толщина изоляции, мм: по высоте
Пазовая		*Витковая изоляция*				
	1	Изоляция проводника	—			
		Корпусная изоляция				
	2	Стеклослюдинитовая лента ЛС:	0,13			
		при U=10,5 кВ		9 вполнахлеста	6	6
		U=6,6 кВ		6 вполнахлеста	4,5	4,5
		$U \leqslant$ 660 В		3 вполнахлеста	2	2
	3	Лента стеклянная ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Толщина изоляции катушечной стороны:				
		при U=10,5 кВ			6,2	6,2
		U=6,6 кВ			4,7	4,7
		$U \leqslant$ 660 В			2,2	2,2
		Прокладки в пазу				
	4	Стеклотекстолит СТ-I	1	2	2	2
	5, 6	Стеклотекстолит СТ-I	0,5	2	1	1
		Общая толщина изоляции на паз:				
		при U=10,5 кВ			6,2	15,4
		U=6,6 кВ			4,7	12,4
		$U \leqslant$ 660 В			2,2	7,4
Лобовая	1	Изоляция проводника	—		—	—
	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС:	0,13			
		при U=10,5 кВ		9 вполнахлеста	6	6
		U=6,6 кВ		6 вполнахлеста	4,5	4,5
		$U \leqslant$ 660 В		3 вполнахлеста	2	2
	8	Лента стеклянная ЛЭС (покровная)	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Неплотности и неровности	—	—	1	1
		Общая толщина изоляции катушечной стороны:				
		при U=10,5 кВ			7,2	7,2
		U=6,6 кВ			5,7	5,7
		$U \leqslant$ 660 В			3,2	3,2

Примечание. Толщина изоляции дана после опрессовки.

Гильзовая термореактивная изоляция обмоток статоров машин переменного тока

Часть обмотки	Позиции	Назначение изоляции	Материал: Наименование	Материал: Марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	по ширине 1	по ширине 2
Пазовая	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД		0,5 на две стороны	—	0,5	1,0
	2	Корпусная	Полотно стеклослюдинитовое		0,17		4,0	
			Разбухание изоляции провода				0,05	0,10
	3	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой впритык	0,2	
			Всего изоляции в катушке				4,75	5,30
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТ-I	0,5	1		
	5	Прокладка	Стеклотекстолит	СТ-I	1	2		
	6	Прокладка	Стеклотекстолит	СТ-I	0,5	1		
			Зазор на укладку				0,2	
			Всего изоляции в пазу				4,95	5,5
Лобовая	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД		0,5 на две стороны		0,5	1,0
			Разбухание изоляции провода				0,05	0,10
	7	Корпусная	Слюдопластолента	СЛФЧ	0,13	3 слоя вполнахлеста	1,56	
	8	Корпусная	Стеклоэскапоновая лента	ЛСЭЛ	0,17	3 слоя вполнахлеста	2,04	
	9	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста	0,4	
			Разбухание изоляции				1,0	
			Всего изоляции в катушке				5,55	6,10

мощностью 100—1000 кВт класса нагревостойкости В на напряжение 6600 В

Двусторонняя толщина изоляции, мм, при числе проводников в катушке по высоте													
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
4,0													
0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
0,2													
5,30	5,85	6,40	6,95	7,50	8,05	8,10	9,15	9,70	10,25	10,8	11,35	11,90	12,45
0,5													
2,0													
0,5													
13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5	24,6	25,7	26,8	27,9
1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
1,56													
2,04													
0,4													
1,0													
6,10	6,65	7,20	7,75	8,30	8,85	9,40	9,95	10,50	11,05	11,60	12,15	12,7	13,25

компаундах. По своим изоляционным свойствам такая изоляция мало уступает гильзовой, но более надежна из-за однородности изоляции пазовых и лобовых частей, большей стойкости к коронированию и большей влагостойкости. По нагревостойкости она относится к классу E, так как температура размягчения асфальтобитумных компаундов лежит в пределах 115—125° C, и является термопластичной изоляцией.

Способность жесткой в холодном состоянии изоляции размягчаться при повторном нагреве создает определенные удобства при укладке обмоток и креплении их лобовых частей, но ограничивает область применения. Пропитанная в битумных компаундах изоляция не может быть применена для классов нагревостойкости B и F и во вращающихся частях машины, так как давление от центробежных сил при размягченном от нагрева при работе компаунде приводит к деформации и выходу изоляции из строя.

В настоящее время в производство электрических машин внедряются более прогрессивные виды высоковольтной изоляции (табл. 3-3). В качестве основного изоляционного материала в них используются различные слюдинитовые полотна или ленты, а для компаундирования — эпоксидные компаунды. Эпоксидные компаунды в отличие от битумных термореактивны, и катушки обмотки сохраняют жесткость и механическую прочность после их изготовления независимо от последующего нагрева.

Для того чтобы иметь возможность несколько деформировать такие катушки при укладке их в пазы, укладку обмотки производят непосредственно после компаундирования, а в компаунд добавляют составы, называемые замедлителями, которые удлиняют время отверждения компаунда на срок, необходимый для укладки и крепления катушек. Применяется также метод компаундирования или пропитки катушек после укладки их в пазы.

Большая монолитность изоляции, лучшие электрические свойства эпоксидных компаундов и механическая прочность катушек позволили уменьшить толщину корпусной изоляции и тем самым улучшить использование зубцовой зоны в современных машинах высокого напряжения.

Напряжение между витками в обмотках машин при среднем уровне индукции возрастает с увеличением их габаритов. Машины высокого напряжения изготовляют, как правило, большой мощности и габаритов. Напряжение между витками в их обмотках при номинальном режиме достигает нескольких десятков вольт. Например, в асинхронных двигателях мощностью около 1000 кВт с номинальным напряжением 6 кВ напряжение между витками превышает 50 В. При различных перенапряжениях, связанных с коммутационными процессами (включением и отключением двигателей) или атмосферными (грозовые перенапряжения), этот уровень может повышаться в несколько раз. Особенно большие перенапряжения (в десятки и более раз) приходятся на витки первой катушки каждой фазы. Поэтому вопросам увеличения надежности витковой изоляции обмоток крупных машин уделяется большое внимание.

В современных машинах высокого напряжения витковая изоляция выполняется из ленточного материала (микаленты или стекломикаленты), который накладывается по всей длине каждого из витков катушки поверх проводниковой изоляции.

Если эффективный проводник обмотки состоит из двух или из четырех элементарных, витковая изоляция охватывает одновременно все элементарные проводники (см. рис. 3-1). Толщина витковой изоляции для обмоток машин высокого напряжения приведена в табл. 3-4.

Следует отметить, что кабельная промышленность выпускает несколько марок обмоточных проводов с усиленной изоляцией, при которой не требуется наложения на проводники дополнительного слоя витковой изоляции.

Таблица 3-4

Витковая изоляция обмоток статоров машин переменного тока с гильзовой изоляцией на 3300 В и непрерывной компаундированной на 3300—6600 В

Класс изоляции	Исполнения изоляции обмотки	Марка обмоточного провода	Витковая изоляция	
			Материал и способ наложения	Двусторонняя толщина изоляции одного витка, мм
E, B	Непрерывная компаундированная	ПСД	Микалента ЛФЧ-II, 0,10—0,13 мм, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4—0,5
B	Гильзовая	ПСД	Микалента ЛФЧ-II, 0,10—0,13 мм, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4—0,5
F	Гильзовая	ПСД	Стекломикалента СЭЛГГ, 0,13 мм, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,5
B, F	Гильзовая и непрерывная компаундированная	ПЭТВСД	—	—

Для высоковольтных обмоток с изоляцией класса В выпускается обмоточный провод марки ПЭТВСД с усиленной эмалеволокнистой изоляцией. Разработаны также аналогичные провода для обмоток высокого напряжения класса нагревостойкости F, имеющие изоляцию из стеклослюдинитовых лент. Толщина усиленной проводниковой изоляции меньше, чем общая толщина обычной проводниковой и витковой изоляции, наложенной на проводник в процессе изготовления высоковольтных катушек, что дает возможность повысить использование зубцовой зоны, значительно уменьшает трудоемкость изготовления катушек (отпадает операция по наложению дополнительной витковой изоляции) и повышает надежность изоляции обмотки.

В стержневых обмотках статоров машин высокого напряжения (см. рис. 3-4) корпусная изоляция выполняется непрерывной компаундированной в битумных (класс нагревостойкости Е) или эпоксидных (класс нагревостойкости В) компаундах и имеет все отличительные свойства непрерывной компаундированной изоляции катушечной обмотки машин высокого напряжения, рассмотренные выше.

Особенностью конструкции изоляции высокого напряжения стержневых обмоток статоров машин переменного тока является отсутствие специальной витковой изоляции, так как при двух эффективных проводниках в пазу между ними находятся два слоя корпусной изоляции стержней. Это в значительной степени увеличивает надежность стержневых обмоток по сравнению с катушечными. Элементарные проводники стержней изготавливаются из обмоточного провода марки ПСД.

Для того чтобы иметь возможность произвести транспозицию элементарных проводников, они размещаются в стержне в два столбика, между которыми располагают вертикальную прокладку из прочного в механическом отношении изоляционного материала.

В машинах низкого напряжения (до 660 В) с усиленной изоляцией (влагостойкой, химостойкой, тропического исполнения и др.) также применяют обмотку из жестких катушек с гильзовой или непрерывной изоляцией, конструкция которой аналогична изоляции высоковольтных обмоток (см. рис. 3-9, *а*), но имеет меньшую толщину. Такая обмотка укладывается в открытые пазы.

Для низковольтных машин применяют два типа гильз: твердые и мягкие. Твердые гильзы, так же как и в высоковольтных обмотках, выполняются из микафолия, стекломикафолия или из материалов на основе слюдинита с последующей горячей обкаткой и запечкой. Мягкие гильзы выполняются обертыванием пазовых частей катушек листовым изоляционным материалом типа гибкого миканита с последующей обкаткой нанесенных слоев горячими утюгами.

Таблица 3-5

Гильзовая изоляция (твердая гильза) обмоток статора машин переменного тока напряжением до 660 В классов нагревостойкости изоляции B, F и H

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование	Марка	Толщина, мм	Количество слоев: по ширине	по высоте	Толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте
Класс B нормального и усиленно-влагостойкого исполнения								
Пазовая	1	Витковая изоляция [1]						
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	3	Микафолий	МФГ	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
		Двусторонняя толщина изоляции пазовой части катушки					1,6	1,6
	4	Электронит		0,2	2	3	0,4	0,6
	5	Электронит		0,5	—	1	—	0,5
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ	0,5		1		0,5
	7	Текстолит	В					0,5
		Допуск на укладку		0,5		1	0,3	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)				—	2,3	5,8
Лобовая	8	Микалента	ЛФЧ-II	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4
	9	Стеклянная лента	ЛЭС	0,10	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
	10	Стеклянная лента	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку		0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки					0,5	0,5
		Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки					2,5	2,5

Продолжение табл. 3-5

Класс изоляции В тропического исполнения, классы F и H всех исполнений

Часть обмотки	Позиция	Материал					Число слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка для класса			Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
			B	F	H					
Пазовая (то же, что для класса В нормального исполнения)	1	Витковая изоляция[1]								
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,2	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	3	Стекломикафолий	СМФГ	МФП-Т	СМФК	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
		Двусторонняя толщина изоляции пазовой части катушки							1,6	1,6
	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	ЛСБ	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5		1		0,5
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ[1]	ГФПС-ЛСП[1]	ГФКС-ЛСК[1]	0,5		1		0,5
	7	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5		1		0,5
		Допуск на укладку							0,3	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)							2,2	5,7
Лобовая (то же, что для класса В нормального исполнения)	8	Стекломикалента	С2ЛФГ	С2ЛФГ	ЛС2ФК	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4
	9	Стеклянная лента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
	10	Стеклянная лента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку		0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки							0,5	0,5
		Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки							2,5	2,5

[1] В качестве витковой изоляции в обмотках с изоляцией класса В применяют прокладки из гибкого миканита ГФЧО; в обмотках с изоляцией класса F — из гибкого стекломиканита $Г_2ФЭ1$; в обмотках с изоляцией класса H — из гибкого стекломиканита $Г_2ФК$-II. Толщина прокладок 0,2—0,25 мм.

Таблица 3-6

Непрерывная термореактивная изоляция статорных обмоток машин переменного тока напряжением до 660 В, классов нагревостойкости В и F

Часть обмотки	Позиция	Назначение изоляции	Материал: Наименование	Материал: Марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина, мм, при числе проводников: по ширине 1	по ширине 2	по высоте 2	по высоте 3	по высоте 4	по высоте 5	по высоте 6
Пазовая	1	Витковая	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
			Разбухание изоляции от промазки лаком				0,05	0,1	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3
	2	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛСП-7	0,13	4 слоя вполнахлеста	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2.08
	3	Покровная	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
			Всего изоляции в катушке				3,03	3,08	3,53	4,03	4,53	5,03	5,53
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТЭФ-I	0,5	1			0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	Прокладка	Стеклотекстолит	СТЭФ-I	1,0	1			1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	6	Прокладка	Стеклотекстолит	СТЭФ-I	0,5	1			0,5	0,5	0,5	0,5	0.5
			Допуск на укладку				0,2	0,2	—	—	—	—	—
			Всего изоляции в пазу				3,23	3,28	9,06	10,06	11,06	12,06	13,06
Лобовая	1	Витковая	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
			Разбухание изоляции				0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,15	0,3
	7	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛС-ПЭ-934-ТП	0,13	3 слоя вполнахлеста	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
	8	Покровная	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,2	2 слоя впритык	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
			Всего изоляции в лобовых частях				2,96	3,01	3,46	3,96	4,46	4,96	5,46

Примечания: 1. Для изготовления катушек применять провод ПСД или ПЭТВСД.
2. При применении провода ПЭТВСД витковую изоляцию (позиция 1) не накладывать.

Таблица 3-7

Изоляция обмоток статоров машин переменного тока с полуоткрытыми прямоугольными пазами. Напряжение до 660 В. Классы изоляции B, F, H

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование, марка — Класс B	Класс F	Класс H	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте
Пазовая	1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,2	0,2
	2	Бумага телефонная бакелитизированная	Бумага фенилоновая лакированная		0,09	1,5 оборота	0,6	0,6
	3	Лакоткаяеслюдопласт						
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	1	1,1	1,1
		Стеклотекстолит						
	4	СТ	СТЭФ	СТК	1,0	1	—	1,0
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	—	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	—	0,5
		Допуск на укладку обмотки					0,3	0,6
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой и без клина)					2,2	4,5
Лобовая. Полукатушки группы: Крайние		Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в двух местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
	1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1
	7	Стеклолакоткань						
		ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15	1 вполнахлеста	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					1,6	1,6
Лобовая. Полукатушки группы: Средние		Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
	1	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1
		Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					0,6	0,6

Непрерывная изоляция машин низкого напряжения по конструкции и технологии изготовления аналогична изоляции высокого напряжения. По электрической прочности она примерно равноценна гильзовой, а по влагостойкости лобовых частей превосходит ее. Однако изготовление непрерывной изоляции значительно более трудоемко, чем гильзовой, особенно изоляции с мягкой гильзой.

Конструкция корпусной изоляции обмоток машин низкого напряжения, укладываемых в открытые пазы, приведена в табл. 3-5 и 3-6.

При необходимости в качестве витковой изоляции в таких обмотках используются прокладки между витками в пазовых и лобовых частях катушки. Толщина и материал прокладок в зависимости от класса нагревостойкости корпусной изоляции приведены в примечаниях к табл. 3-5.

Если электрическая машина низкого напряжения мощностью более 100 кВт предназначена для эксплуатации в нормальных условиях, то ее обмотку обычно выполняют полужесткой, из подразделенных катушек (полукатушек), а пазы статора — полуоткрытыми (см. рис. 3-9, *б*).

Последовательность установки полукатушек в пазы, определяемая формой шлица полуоткрытого паза (см. рис. 3-2), не позволяет изолировать их пазовые части заранее, до укладки в машину, поэтому в полужесткой обмотке изолируют не катушки, а пазы.

Корпусная изоляция выполняется из нескольких слоев листового материала в виде так называемой пазовой коробочки. Такая конструкция менее надежна, чем гильзовая или непрерывная изоляция катушек, укладываемых в открытые пазы, но широко применяется, так как машины, статоры которых выполнены с полуоткрытыми пазами, более экономичны. Лобовые части полужесткой обмотки изолируются ленточным материалом.

Конструкция изоляции полужесткой обмотки приведена в табл. 3-7. Для корпусной изоляции класса нагревостойкости В в современных машинах используют листовой лакослюдопласт, имеющий достаточную механическую и электрическую прочность, что позволяет выполнять пазовую коробочку одинарной, из одного слоя лакослюдопласта. При этом толщина изоляции по сравнению с многослойной уменьшается при той же электрической и механической прочности.

Полукатушки при изготовлении обмоток наматывают попарно из прямоугольных проводов марок ПЭВП (классы А и Е), ПЭТВП (класс В) и ПЭТП-155 (класс F).

В пазовой части дополнительная витковая изоляция не устанавливается, так как двойной слой проводниковой изоляции обмоточных проводов этих марок обеспечивает достаточную надежность изоляции между витками обмотки.

В лобовых частях устанавливают прокладки между первыми тремя витками каждой полукатушки, так как эти витки испытывают большое относительное удлинение от растягивающих усилий при их намотке, которое может привести к снижению прочности проводниковой изоляции или к ее повреждению.

После намотки витки полукатушек для предохранения от рассыпания проклеивают лаком (обволакивают) и скрепляют по длине пазовой части телефонной (при классе изоляции В) или фенилоновой лакированной (при классе F) бумагой.

Примеры исполнения изоляции всыпных обмоток приведены в табл. 3-8 и 3-9.

Из сравнения конструкции пазовой изоляции машин с высотой оси вращения до 160 мм, т. е. мощностью до 15—16 кВт (табл. 3-8), и машин большей мощности (табл. 3-9) следует, что ее толщина при одном и том же уровне напряжения различна. Это объясняется более жесткими требованиями к механической прочности изоляции машин большей мощности.

Дополнительная витковая изоляция во всыпных обмотках ни в пазовой, ни в лобовых частях не устанавливается, так как, во-первых, витки обмотки не имеют зара-

Таблица 3-8

Изоляция однослойных и двухслойных всыпных обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм. Напряжение до 660 В. Классы изоляции B, F, H

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм	Позиция	Материал. Наименование, марка. Класс B	Материал. Наименование, марка. Класс F	Материал. Наименование, марка. Класс H	Материал. Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя толщина, мм
	Однослойная	50—80		Пленкостеклопласт					
			1	Изофлекс	Имидофлекс		0,2	1	0,2
			2	»	»		0,3	1	0,3
		90—132		Пленкостеклопласт					
			1	Изофлекс	Имидофлекс		0,25	1	0,25
			2	»	»		0,35	1	0,35
		160		Пленкостеклопласт					
			1	Изофлекс	Имидофлекс		0,4	1	0,4
			2	»	»		0,5	1	0,5
	Двухслойная	180—250		Пленкостеклопласт					
			1	Изофлекс	Имидофлекс		0,4	1	0,4
			2	»	»		0,4	1	0,4
			3	»	»		0,5	1	0,5

Примечание. Междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из материала, указанного для поз. *1* рисунков.

Таблица 3-9

Изоляция всыпных обмоток статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geqslant 280$ мм и напряжением до 660 В

Позиция	Материал. Наименование, марка. Класс B	Материал. Наименование, марка. Класс F	Материал. Наименование, марка. Класс H	Толщина, мм. Класс B	Толщина, мм. Класс F	Толщина, мм. Класс H	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм. Класс B	Односторонняя толщина изоляции, мм. Класс F	Односторонняя толщина изоляции, мм. Класс H
	Пленкосинтокартон									
1*	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
2**	Электронит			0,3	0,3	0,28	1	0,3	0,3	0,28
—	Общая толщина пазовой изоляции			0,55	0,58	0,56		0,55	0,58	0,56
	Лакотканеслюдопласт									
3	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,55	0,55
	Пленкосинтокартон									
4	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
5	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28

* К обмотке.
** К стенке паза.

Примечание. Междуфазные прокладки в лобовых частях обмотки выполняют из лакотканеслюдопласта.

Таблица 3-10

Изоляция катушечных обмоток фазных роторов асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт с катушечной обмоткой изоляции В

Часть обмотки		Позиция	Материал			Количество слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
			Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая			Разбухание изоляции меди от промазки лаком					0,1	0,1
		1	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
			Всего на одну катушку		—	—	—	0,3	0,3
		2	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
		3	Гибкий миканит	ГФС	0,2	2	3	0,4	0,6
		4	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
		5	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5
		6	Стеклотекстолит	СТ	0,5		1	—	0,5
		7	Стеклотекстолит	СТ	0,5		1	—	0,5
			Допуск на укладку					0,5	0,8
			Всего на паз без клина					2,0	4,7
Лобовая	Средние катушки в катушечной группе	8	Стеклянная лента	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
	Крайние катушки в катушечной группе	9	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
		10	Стеклянная лента	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
			Толщина изоляции крайних катушек					1,6	1,6

Таблица 3-11

Изоляция стержневых обмоток фазных роторов асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geqslant 280$ мм

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование, марка: Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм: Класс B	Классы F и H	Напряжение до 750 В: Число слоев: Класс B	Классы F и H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте	Напряжение до 1200 В: Число слоев: Класс B	Классы F, H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте
Пазовая	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,15	0,16	4,5* оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	9,5* оборота	7,5 оборота	2,4	4,8
		Стеклолакоткань												
	2	ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15		1		0,3	0,3	1	1	0,3	0,3
		Стеклотекстолит												
	3	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1			0,5	1	1		0,5
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1			0,5	1	1		0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1			0,5	1	1		0,5
		Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5			0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без клина)							1,7	4,0			3,0	6,6
Лобовая	6	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ 0,05×3= =0,15 мм	0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	2 вполнахлеста		1,2	1,2
	7	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	2 вполнахлеста		0,6	0,6
		Общая толщина изоляции стержня в лобовой части							1,0	1,0			1,8	1,8

* С учетом усадки на 15—20%.

нее определенного места в пазу («всыпание» проводников в паз может производиться не в той последовательности, как их намотка в заготовке катушки), а во-вторых, электрическая прочность проводниковой изоляции обмоточных проводов в небольших по габаритам машинах оказывается вполне достаточной, чтобы выдержать напряжения, возникающие между витками одной катушки. Однако в двухслойных всыпных обмотках обязательно устанавливают изоляционные прокладки между слоями обмотки — сторонами разных катушек в одном пазу (см. рис. 3-9, *г*). Эти прокладки должны иметь такую же электрическую прочность, как и корпусная изоляция, так как в обмотках с укорочением шага в некоторых пазах оказываются стороны катушек, принадлежащих разным фазам. При этом напряжение между проводниками разных катушек в одном пазу соизмеримо с линейным напряжением сети (оно зависит от положения катушек в схеме обмотки).

Дополнительная изоляция в лобовых частях всыпных обмоток устанавливается только между катушками разных фаз, т. е. между крайними катушками разных катушечных групп. В большинстве конструкций между лобовыми частями этих катушек устанавливают прокладки из листового материала того же класса нагревостойкости, что и корпусная изоляция. Более надежна изоляция лобовых частей крайних катушек ленточным материалом, применяемая в машинах бо́льших мощностей.

В двигателях мощностью до 40—60 кВт, а в некоторых исполнениях и до 100 кВт обмотки фазных роторов выполняются из жестких катушек, намотанных прямоугольным проводом, и укладываются в открытые пазы. По конструкции пазовой и витковой изоляции такая обмотка аналогична обмотке из полужестких катушек, укладываемых в полуоткрытые пазы статора. Примеры выполнения изоляции в зависимости от класса нагревостойкости приведены в табл. 3-10.

Изоляция лобовых частей зависит от расположения катушек в катушечных группах. Крайние катушки в группе (первая и последняя) имеют более толстую изоляцию по сравнению со средними, чем достигается надежность изоляции между фазами обмотки ротора.

Стержневые волновые обмотки применяют в фазных роторах асинхронных двигателей свыше 100 кВт, а в ряде исполнений начиная с мощности 40—60 кВт. Стержни обмотки выполняются из голой меди с твердой изоляцией. Конструкция изоляции стержневых обмоток роторов приведена в табл. 3-11. В таблице даны два значения числа слоев и толщины изоляции в зависимости от напряжения на кольцах ротора, которое определяется обмоточными данными машины.

Гильзы для роторных стержней изготавливаются из микафолия, стекломикафолия или из листовых материалов на основе слюдинитов: слюдинитофолия, стеклослюдинитофолия и слюдинитопластофолия. В качестве связующих для изготовления гильз применяются термореактивные лаки. Лобовые части стержней изолируются ленточными материалами. Слабым в электрическом отношении местом в изоляции роторных стержней, так же как и в катушечных обмотках статоров с гильзовой изоляцией, является место стыка двух видов изоляции — гильзовой на пазовой части и непрерывной на лобовой.

3-3. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА

Зубцовая зона — наиболее напряженный в магнитном отношении участок магнитопровода, поэтому при проектировании машин стремятся выбрать наименьшие размеры пазов, обеспечивающие размещение в них необходимого числа проводников обмотки и изоляции. Степень использования пространства паза для размещения меди обмотки оценивается коэффициентом заполнения паза медью $k_м$, представляющим собой отношение суммарной площади сечения всех про-

Таблица 3-12

Средние значения коэффициентов заполнения паза

Тип обмотки	Значения коэффициентов	
	$k_з$	$k_м$
Всыпные обмотки на напряжение до 660 В из круглого провода с эмалевой изоляцией	0,72	0,30
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 3000 В (провод марки ПСД)	0,70—0,80	0,22—0,37
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 6000 В	0,60—0,70	0,14—0,25

водников в пазу к площади паза «в свету» $S_п$:

$$k_м = \frac{q_{эл}\, n_{эл}\, u_п}{S_п}, \qquad (3\text{-}1)$$

где $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном;

$q_{эл}$ — сечение элементарного проводника;

$u_п$ — число эффективных проводников в пазу.

Коэффициент $k_м$ зависит от общего количества изоляции в пазу, т. е. от толщины корпусной, витковой и проводниковой изоляции и наличия разных изоляционных прокладок. При возрастании толщины изоляции, например в машинах с более высоким номинальным напряжением или при использовании худших изоляционных материалов, коэффициент заполнения паза медью уменьшается. Это приводит к ухудшению использования пазового пространства, а следовательно, и всей зубцовой зоны машины.

Средние значения $k_м$ для современных электрических машин в зависимости от номинального напряжения и типа обмоток приведены в табл. 3-12.

В машинах с обмотками из прямоугольных проводов $k_м$ может быть рассчитан достаточно точно, так как при проектировании заранее определяют местоположение каждого из проводников в пазу.

Во всыпных обмотках положение каждого из проводников в пазу заранее не может быть определено. Кроме того, плотность размещения проводников в пазу не постоянна. Она зависит от усилий, прикладываемых обмотчиком при уплотнении проводников по мере укладки их в пазы. Опытом установлено, что при чрезмерно большой плотности укладки круглых проводов в пазы трудоемкость обмоточных работ неоправданно возрастает, а надежность обмотки резко ухудшается из-за возникающих при этом механических повреждений проводниковой изоляции.

Плотность укладки проводников в пазы оценивается технологическим коэффициентом заполнения проводниками свободной от изоляции площади паза:

$$k_з = \frac{d_{из}^2\, n_{эл}\, u_п}{S'_п}. \qquad (3\text{-}2)$$

Числителем этого выражения является произведение площади квадрата, описанного вокруг изолированного элементарного проводника с диаметром $d_{из}$, на число всех элементарных проводников в пазу $n_{эл}\, u_п$, а знаменателем — площадь паза, свободная от изоляции $S'_п$, т. е. та площадь, в которой располагаются проводники обмотки. Коэффициент $k_з$ обычно называют коэффициентом заполнения паза, он характеризует только технологичность укладки всыпной обмотки, а не степень использования всего пространства паза при размещении проводников обмотки. Так, при одной и той же плотности укладки обмотки $k_з$ будет одинаков для обмоток машин с разной толщиной пазовой или проводниковой изоляции при двухслойной и однослойной обмотках.

В современном электромашиностроении плотность укладки обмотки стремятся выполнить такой, что-

бы $k_з$ был в пределах 0,70—0,75 при ручной укладке обмоток и 0,7—0,72 при механизированной.

3-4. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основным элементом обмотки электрической машины является виток. Несколько последовательно соединенных витков, находящихся в одних и тех же пазах, объединяются между собой общей корпусной изоляцией и образуют катушку обмотки. Каждая из сторон катушек располагается в одном пазу. Если весь паз занят стороной только одной катушки (стороны катушек располагаются в один слой), то обмотка называется однослойной. Если в каждом пазу размещены стороны двух катушек, одна над другой, то обмотку называют двухслойной.

Несколько последовательно соединенных между собой катушек, расположенных в соседних пазах, образуют катушечную группу, представляющую собой обмотку полюса или пары полюсов одной из фаз машины. Число катушек в катушечной группе обозначают q. Так как q катушек располагаются в соседних пазах, то одноименные стороны этих катушек занимают q пазов, поэтому число q называют числом пазов на полюс и фазу, т. е. числом пазов, в которых лежат стороны катушек, образующих обмотку полюса машины.

В пределах одной катушечной группы все катушки могут быть соединены только последовательно, так как векторы ЭДС катушек, находящихся в различных пазах, сдвинуты относительно друг друга на пазовый угол и при параллельном соединении возникнут большие уравнительные токи. Параллельные соединения в пределах катушечной группы применяют только в некоторых специальных обмотках крупных двухполюсных турбогенераторов. Возможность таких соединений рассматривается в специальной литературе [31].

Несколько соединенных между собой катушечных групп образуют фазу обмотки. Катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно или параллельно. Количество катушечных групп в каждой из фаз зависит от числа полюсов и типа обмотки. Число параллельных ветвей при соединении катушечных групп определяется при расчете обмоток.

Концы фаз в большинстве случаев внутри электрической машины не соединяют, а подводят к зажимам коробки выводов все начала и все концы фаз, что позволяет включать машины на два напряжения сети, соединяя фазы в звезду или в треугольник. Напряжение, приходящееся на фазу обмотки статора, при этом не изменяется.

Изображение схемы. Порядок соединения между собой отдельных катушек, катушечных групп и фаз обмотки задается в технической документации в виде схематического чертежа, который называется схемой обмотки. При вычерчивании схем принят ряд условностей: чертеж с изображением схемы обмотки выполняется без соблюдения масштаба и не отражает никаких размерных соотношений машины или обмотки и ее частей; каждая катушка изображается на схеме одной линией, независимо от числа витков в ней и элементарных проводников в каждом витке; все катушки изображаются в одной плоскости и т. п.

Известны несколько способов изображения схем, из которых наибольшее распространение получили так называемые развернутые и торцевые схемы. Торцевая схема представляет собой как бы вид с торца

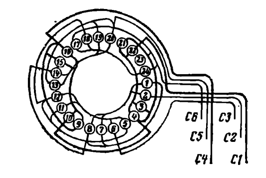


Рис. 3-10. Торцевая схема однослойной концентрической обмотки, $Z=24$, $2p=4$.

на обмотанный сердечник (рис. 3-10). На ней удобно проследить положение лобовых частей катушек, но имеется мало места для изображения межкатушечных и межгрупповых соединений, что неудобно в сложных схемах, имеющих несколько параллельных ветвей.

Развернутые схемы (см. рис. 3-17) представляют собой развертку статора или ротора с обмоткой и позволяют показать все соединения между элементами обмотки.

Фазная зона. Стороны катушек одной катушечной группы распределены в q лежащих рядом пазах. В симметричной m-фазной обмотке на каждом полюсном делении таких групп будет m по q пазов в каждой. Следовательно, стороны катушек, принадлежащих одной фазе, расположены на каждом полюсном делении τ в пазах, занимающих $1/m$-ю его часть или $\pi D/2pm=\tau/m$-ю часть окружности сечения зазора, называемую фазной зоной. В обмотках трехфазных машин, построенных по такому принципу, фазная зона занимает дугу окружности, содержащую электрический угол $\tau/m=180/3=60°$, поэтому их называют обмотками с 60-градусной фазной зоной.

Это не единственное возможное распределение катушечных групп разных фаз на полюсном делении. Иногда применяют обмотки, в которых mq пазов располагаются не на одном, а на двух полюсных делениях. Фазная зона в этих случаях будет занимать $2\tau/m$-ю часть окружности. В трехфазных машинах это соответствует электрическому углу 120°, такие обмотки называют обмотками с 120-градусной фазной зоной.

В большинстве трехфазных машин применяют обмотки с 60-градусной фазной зоной. В некоторых типах машин, например в многоскоростных асинхронных двигателях с переключением числа полюсов, для работы с большим числом пар полюсов применяют обмотку со 120-градусной фазной зоной.

Ниже рассмотрены некоторые наиболее распространенные схемы обмоток с 60-градусной фазной зоной.

Расположение выводов фаз. Стороны катушек, с которыми соединяются начала фаз обмотки, должны располагаться в пазах, между которыми заключается такой же электрический угол, как и между фазами питающей сети, т. е. $2\pi/m$ радиан или кратное этому числу $2\pi k/m$, где k — любое целое число, не кратное m. В трехфазных машинах это 120° k (при k, кратном числу фаз, в таких пазах расположены стороны катушек, принадлежащие одной и той же фазе). Учитывая, что пазовый угол $\alpha_z=2\pi p/Z$, получаем, что начальные стороны первых катушек разных фаз должны быть расположены через $\frac{2\pi k/m}{2\pi p/Z}=\frac{Z}{pm}\times k=2qk$ пазов.

В обмотках статоров для уменьшения длины выводных концов выводы фаз стремятся расположить как можно ближе один к другому. В этих случаях принимают $k=1$ и начала фаз располагают на расстоянии $2q$ пазов друг от друга.

В обмотках фазных роторов асинхронных двигателей начала фаз стремятся расположить симметрично по окружности, т. е. через Z/m пазов. Для этого берут $k=p$. Такое симметричное расположение выводов возможно лишь при числе пар полюсов, не кратном трем.

3-5. ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Обмоточный коэффициент учитывает уменьшение ЭДС фазы, уложенной в пазы обмотки электрической машины, по сравнению с расчетной ЭДС обмотки с тем же числом витков, но имеющей диаметральный шаг и сосредоточенной в одной катушке. Обмоточный коэффициент представляют в виде произведения

$$k_{об}=k_у k_р, \qquad (3\text{-}3)$$

где $k_у$ — коэффициент укорочения, учитывающий уменьшение ЭДС витка, вызванное укорочением шага обмотки; $k_р$ — коэффициент распре-

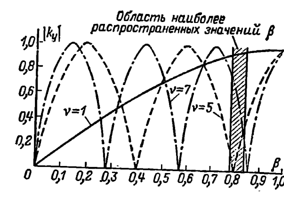


Рис. 3-11. Изменения коэффициента укорочения для различных гармоник в зависимости от β.

деления, учитывающий уменьшение ЭДС распределенной по пазам обмотки по сравнению с сосредоточенной.

Коэффициент укорочения. Отношение действительного шага y к полюсному делению τ называют укорочением шага $\beta = y/\tau$, а отношение ЭДС витка с укороченным шагом к его ЭДС при диаметральном шаге называют коэффициентом укорочения. Коэффициент укорочения для первой гармоники

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta, \qquad (3\text{-}4)$$

а в общем случае для любой гармоники

$$k_{y\nu} = \sin \frac{\pi}{2} \beta\nu, \qquad (3\text{-}5)$$

где ν — порядок гармоники.

На рис. 3-11 приведены кривые изменения k_y и показана область наиболее распространенных в практике значений укорочения ($\beta = 0{,}79 \div 0{,}83$), при которых достигается значительное уменьшение гармоник ($\nu = 5$ и $\nu = 7$) при относительно малом уменьшении ЭДС первой гармоники. В практике почти все машины, кроме машин малой мощности, выполняют с обмоткой, имеющей укороченный шаг.

Следует отметить, что в отдельных случаях возникает необходимость применения обмотки с укорочением шага до 0,5 τ, например в мощных двухполюсных машинах с обмоткой из жестких катушек. При укорочении $\beta \approx 0{,}8$ ширина катушек такой обмотки больше, чем внутренний диаметр статора, почти на двойную глубину пазов и укладка их в пазы чрезвычайно затруднена, а в некоторых случаях просто невозможна. Чтобы избежать такого положения, обмотку выполняют с укорочением, близким к $\beta = 0{,}58 \div 0{,}63$. При этом ширина катушек уменьшается и обмотка может быть уложена в пазы.

Коэффициент распределения. Представим себе, что обмотка полюса электрической машины образована q катушками, стороны которых помещены в одних и тех же больших пазах (рис. 3-12, *а*). Кривая МДС такой сосредоточенной обмотки близка к прямоугольной и помимо первой гармоники в ней присутствует целый спектр гармоник высших порядков. Если же эти катушки расположить в q соседних пазах, то кривая их МДС, как показано на рис. 3-12, *б*, будет представлять собой ступенчатую трапецию. Гармонический анализ показывает, что высшие гармоники в ней значительно менее выражены, чем в прямоугольной кривой. Однако суммарная ЭДС распределенной обмотки будет меньше, чем сосредоточенной. Оси распределенных в q соседних пазах катушек сдвинуты относительно друг друга на электрический угол $2\pi p/Z$ радиан. Векторы их ЭДС сдвинуты между собой на этот же угол, поэтому суммарная ЭДС катушечной группы будет равна не алгебраической, а геометрической сумме ЭДС всех ка-

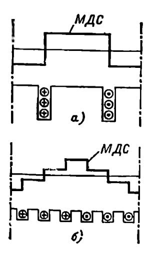


Рис. 3-12. Кривые МДС сосредоточенной и распределенной обмоток.

тушек, входящих в группу, т. е. $E_{к,г}=|\Sigma\dot{E}_к|$. Отношение $E_{к,г}$ распределенной обмотки к расчетной ЭДС, равной произведению числа катушек на ЭДС $E_к$ каждой из них, называют коэффициентом распределения $k_р=E_{к,г}/qE_к$.

водников обмотки по дуге полюсного деления ($q=\infty$). Уменьшение $k_р$ происходит по-разному для различных гармоник. Как видно из табл. 3-13, для первой гармоники он уменьшается до значения $k_р=0{,}955$,

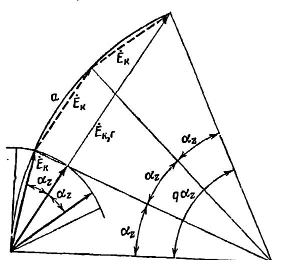


Рис. 3-13. К расчету коэффициента распределения обмотки.

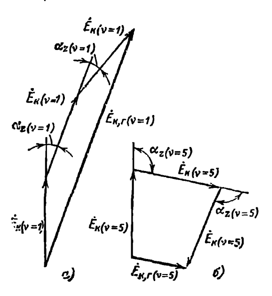


Рис. 3-14. Электродвижущие силы катушечных групп для 1-й и 5-й гармоник.

Из рис. 3-13 видно, что коэффициент распределения для первой гармоники трехфазных машин равен:

$$k_р=\frac{\sin\dfrac{\pi}{2m}}{q\sin\dfrac{\pi}{2mq}}=\frac{0{,}5}{q\sin\dfrac{30^\circ}{q}}. \quad (3\text{-}6)$$

Для высших гармоник пазовый угол $\alpha_{z\nu}$ зависит от порядка гармоники:

$$\alpha_{z\nu}=\frac{2\pi p}{Z}\nu=\frac{\pi}{mq}\nu, \quad (3\text{-}7)$$

поэтому коэффициент распределения в общем случае при целом числе q для любой из гармоник

$$k_{р\nu}=\frac{\sin\dfrac{\pi}{m}\nu}{q\sin\dfrac{\pi}{mq}\nu}. \quad (3\text{-}8)$$

Анализ этого выражения показывает, что при $q=1$ для всех гармоник $k_р=1$. С увеличением числа q коэффициент распределения уменьшается до определенных пределов, соответствующих абсолютно равномерному распределению проводников обмотки по дуге полюсного деления ($q=\infty$). Уменьшение $k_р$ происходит по-разному для различных гармоник. Как видно из табл. 3-13, для первой гармоники он уменьшается до значения $k_р=0{,}955$, а $k_р$ для высших гармоник уменьшается значительно более быстро.

На рис. 3-14 приведено для иллюстрации графическое определение $\dot{E}_{к,г}$ для первой и пятой гармоник при $q=3$. Так как угол между векторами ЭДС пятой гармоники в пять раз больше, чем для первой, сумма векторов ЭДС этой гармоники для трех катушек, составляющих одну катушечную группу, будет значительно меньше, чем ЭДС первой гармоники.

Коэффициент скоса. Анализ выражений (3-5) и 3-8) показывает, что для гармоник, имеющих порядок $\nu_z=\frac{Z}{p}k\pm1$ (для трехфазных машин $\nu_z=6qk\pm1$), где $k=1$, 2, 3... (при $k=1$ их порядок близок к цифре, выражающей число зубцов, приходящихся на пару полюсов машины $\nu\approx Z/p$, поэтому такие гармоники называют гармониками зубцового порядка), значения коэффициентов укорочения и распределения будут такими же, как и для первой гармоники при любых укорочениях и любом числе q (см. подчеркнутые значения в табл. 3-13).

Таблица 3-13

Коэффициенты распределения k_p трехфазных обмоток с фазной зоной 60°

ν \ q	2	3	4	5	6	∞
1	0,966	0,960	0,958	0,957	0,957	0,955
3	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644	0,636
5	0,259	0,217	0,205	0,200	0,197	0,191
7	−0,259	−0,177	−0,158	−0,149	−0,145	−0,136
9	−0,707	−0,333	−0,270	−0,247	−0,236	−0,212
11	−0,966	−0,177	−0,126	−0,110	−0,102	−0,087
13	−0,966	0,217	0,126	0,102	0,092	0,073
15	−0,707	0,667	0,270	0,200	0,172	0,127
17	−0,259	0,960	0,158	0,102	0,084	0,056
19	0,259	0,960	−0,205	−0,110	−0,084	−0,050
21	0,707	0,667	−0,654	−0,247	−0,172	−0,091
23	0,966	0,217	−0,958	−0,149	−0,092	−0,041
25	0,966	−0,177	−0,958	0,200	0,102	0,038
27	0,707	−0,333	−0,654	0,646	0,236	0,071
29	0,259	−0,177	−0,205	0,957	0,145	0,033
31	−0,259	0,217	0,158	0,957	−0,197	−0,051
33	−0,707	0,667	0,270	0,646	−0,644	−0,058
35	−0,966	0,960	0,126	0,200	−0,957	−0,027
37	−0,966	0,960	−0,126	−0,149	−0,957	0,026
39	−0,707	0,667	−0,270	−0,247	−0,641	0,049
41	−0,259	0,217	−0,158	−0,110	−0,197	0,022
43	0,259	−0,177	0,205	0,102	0,145	−0,042
45	0,707	−0,333	0,654	0,200	0,236	−0,042
47	0,966	−0,177	0,958	0,102	0,102	−0,020

Это происходит потому, что электрические углы между векторами ЭДС зубцовых гармоник и первой гармоники отличаются на величину, кратную 2π:

$$\alpha_{z\nu} = \alpha_{z1}\nu_z = \frac{2\pi p}{Z}\left(k\frac{Z}{p} \pm 1\right) = 2\pi k \pm \alpha_z.$$

Однако порядок гармоник увеличивается с увеличением числа q, при этом соответственно уменьшается их амплитуда, а следовательно, и отрицательное влияние на работу машины. В малых машинах, в которых увеличение числа q затруднено, для подавления гармоник зубцового порядка выполняют скошенные пазы, т. е. пазы статора или ротора располагают не параллельно оси машины, а под некоторым углом $\gamma_{ск} = \nu b_{ск}\pi/\tau$, называемым углом скоса (рис. 3-15). При этом ЭДС, наводимая в витках обмотки, уменьшается. Это уменьшение характеризуется коэффициентом скоса

$$k_{ск} = \frac{\sin\frac{\gamma_{ск}}{2}}{0{,}5\gamma_{ск}} \approx 1 - \frac{\gamma_{ск}^2}{24}. \quad (3\text{-}9)$$

В расчетной практике величину скоса $b_{ск}$ оценивают в линейных размерах, показывающих, на сколько миллиметров или на какую часть зубцового деления по дуге окружности расточки сдвинута ось паза по сравнению с положением оси нескошенных пазов (рис. 3-15). Обычно выполняют скос в пределах одного пазового деления. В этом случае $\gamma_{ск}$ для первой гармоники очень мал, $k_{ск}$ близок к единице и при расчете обмоточного коэффициента его не учитывают. Угол $\gamma_{ск}$ возрастает пропорционально порядку гар-

моник и для высших гармонических, в том числе и для гармоник зубцового порядка, $k_{ск}$ будет существенно меньше единицы. Поэтому в машинах со скошенными пазами влияние высших гармоник поля на характеристики машины уменьшается.

Следует отметить, что скос пазов приводит к снижению уровня шума при работе машины, поэтому двигатели в малошумном исполнении всегда выполняют со скошенными пазами.

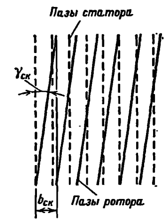


Рис. 3-15. К понятию скоса пазов.

Скос пазов увеличивает длину пазовой части катушек, поэтому его влияние учитывают при расчете активного и индуктивного сопротивлений обмотки.

3-6. СХЕМЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Для того чтобы лучше понять принцип соединений в однослойных обмотках, проделаем некоторые предварительные построения для одной из простейших трехфазных обмоток с числом пазов $Z=24$, числом полюсов $2p=4$, числом параллельных ветвей $a=1$.

На рис. 3-16 показаны 24 линии пазов, разделенные на четыре группы, соответствующие полюсным делениям ($\tau=Z/2p=24/4=6$ пазовых делений). На каждом полюсном делении отметим пазы, в которых должны лежать стороны катушек, принадлежащих разным фазам. Так как обмотка симметрична, то на каждом полюсном делении размещается одинаковое число сторон катушек разных фаз, равное числу пазов на полюс и фазу:

$$q=\frac{Z}{2pm}=\frac{24}{4\cdot 3}=2.$$

Мгновенное направление токов, показанное стрелками на рис. 3-16 в пределах одного полюсного деления (пазы *1—6*), будет одинаковым. В пазах соседних полюсных делений направление токов меняется на противоположное.

Рисунок 3-16 является как бы схемой активной (пазовой) части рассматриваемой обмотки. Лобовые соединения катушек должны быть выполнены так, чтобы направление токов в пазовых частях соответствовало показанному на рисунке. Их можно выполнить в нескольких вариантах, получив при этом тот или

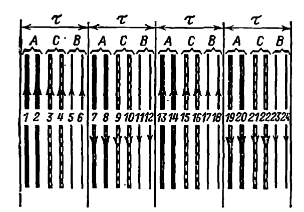


Рис. 3-16. К построению схем однослойных обмоток.

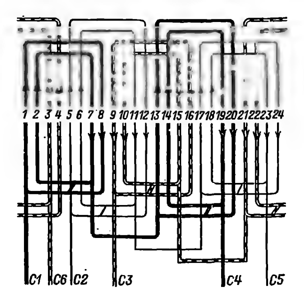


Рис. 3-17. Схема однослойной концентрической обмотки. $Z=24$, $2p=4$.

ной тип однослойной обмотки. Рассмотрим некоторые из возможных вариантов.

Однослойные концентрические обмотки. Схема одной из однослойных концентрических обмоток изображена на рис. 3-17, на котором сохранены принятые на рис. 3-16

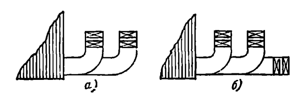


Рис. 3-18. Расположение лобовых частей катушек однослойных концентрических обмоток.

а — двухплоскостной; б — трехплоскостной.

нумерация пазов и толщина линий, обозначающих разные фазы. Однослойные концентрические обмотки характерны тем, что катушки, образующие каждую катушечную группу, являются концентрическими, т. е. охватывают одна другую. Поэтому размеры катушек в катушечной группе различны и по длине, и по ширине. Кроме того, различна длина катушек, принадлежащих соседним катушечным группам —«малым» и «большим». Лобовые части катушек, образующих большие и малые катушечные группы, располагаются в двух разных плоскостях (рис. 3-18, *а*), поэтому такая обмотка называется двухплоскостной. В однослойных концентрических обмотках число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов машины. При четном числе p обмотка получается полностью симметричной, несмотря на различные размеры катушек, так как в каждой фазе содержится одинаковое число больших и малых катушечных групп. В рассмотренном примере (на рис. 3-17) $p=2$ и каждая фаза содержит одну большую и одну малую катушечные группы. При нечетном числе пар полюсов каждая фаза содержит нечетное число катушечных групп. Чтобы уложить такую обмотку в машину, одну из катушечных групп делают «кривой», т. е. одну ее сторону выполняют по размеру большой катушечной группы, а другую — по размеру малой. Это хорошо видно из приведенной на рис. 3-19 схемы обмотки шестиполюсной машины. Необходимости установки кривой катушки можно избежать, выполнив эту обмотку по типу трехплоскостной, т. е. расположив лобовые части не в двух, а в трех плоскостях (см. рис. 3-18, *б*). К схеме трехплоскостной обмотки легко перейти от обычной двухплоскостной при четном q,

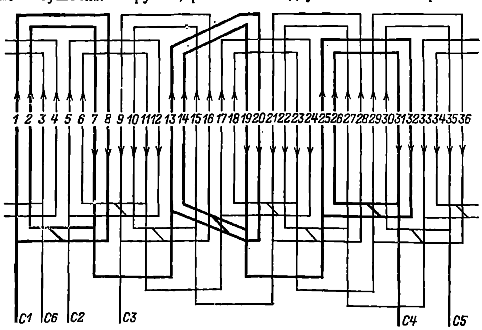


Рис. 3-19. Схема однослойной концентрической обмотки с «кривой» катушкой, $Z=36$, $2p=6$.

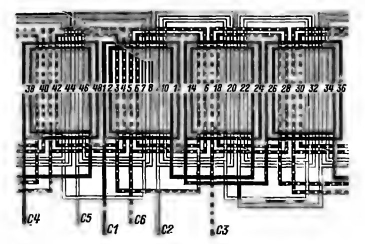


Рис. 3-20. Схема однослойной концентрической трехплоскостной обмотки, $Z=48$, $2p=4$.

изменив направление отгиба лобовых частей половины катушек в каждой катушечной группе (рис. 3-20). Такая обмотка получила название обмотки «вразвалку». Несимметрия фаз в ней (лобовые части катушечных групп каждой из фаз занимают один определенный слой) может быть уменьшена путем усложнения укладки. Для этого лобовые части катушек выполняют длинными с одного торца машины и короткими с другого.

Шаблонные однослойные обмотки. Необходимое направление токов в пазах машины (см. рис. 3-16) может быть получено и при других типах однослойных обмоток, например при шаблонных концентрических обмотках (рис. 3-21). Из сравнения схем обмоток, изображенных на рис. 3-21 и 3-17, видно, что обмотки отличаются друг от друга только формой лобовых частей катушек. Формирование катушечных групп и последовательность их соединения остаются такими же.

Шаблонная обмотка, так же как и обмотка с концентрическими катушками, может быть выполнена «вразвалку», т. е. с изменением направления отгиба половины катушек каждой из катушечных групп.

Цепные обмотки. Другой разновидностью шаблонных обмоток является так называемая цепная обмотка, схема которой приведена на рис. 3-22. И при этом варианте соединений в лобовых частях направление токов в пазах (рис. 3-16) полностью сохраняется.

Разобранные выше схемы однослойных обмоток применяются главным образом в машинах небольшой мощности, так как их обмоточный коэффициент всегда численно равен коэффициенту распределения $k_{об}=k_р$, несмотря на то, что шаг каждой из катушек может быть равен диаметральному, как, например, в концентрической обмотке.

В последние годы область применения однослойных концентрических обмоток несколько расширилась в связи с распространением

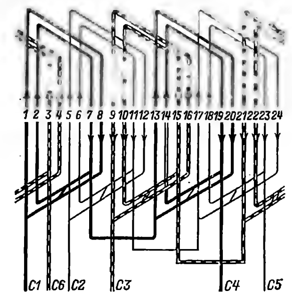


Рис. 3-21. Схема шаблонной обмотки, $Z=24$, $2p=4$.

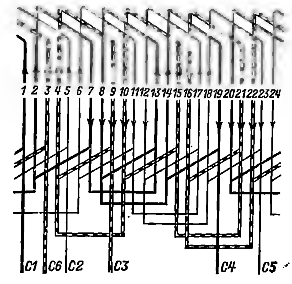


Рис. 3-22. Схема цепной обмотки, $Z=24$, $2p=4$.

станков для механизированной укладки обмотки, так как укладку однослойных обмоток легче механизировать, чем укладку двухслойных.

3-7. СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Двухслойные обмотки применяются практически во всех машинах переменного тока, начиная с машин на мощность 15—16 кВт и до крупных гидро- и турбогенераторов. Только некоторые уникальные турбогенераторы большой мощности с непосредственным охлаждением меди статора имеют однослойные обмотки. Но этот отход от общей тенденции связан со сложностью конструкции и особенностями схем обмоток крупных машин с малым числом полюсов.

Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использовать укорочение шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС. Кроме того, двухслойные обмотки имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с однослойными, например по количеству возможных вариантов выполнения параллельных ветвей, дробного числа пазов на полюс и фазу, равномерности расположения лобовых частей катушек и др.

Принцип соединения в двухслойных обмотках легко проследить на примере построения одной из простейших схем. Составим схему обмотки статора трехфазной машины при $Z=24$, $2p=4$, $a=1$. На рис. 3-23 изображены 24 пары линий (сплошные и пунктирные), обозначающие верхние и нижние стороны катушек, лежащие в пазах, разделенные на четыре полюсных деления. На полюсном делении на каждую фазу приходится по два паза, так как $q=2$. Стрелками на сплошных линиях, соответствующих верхним сторонам катушек, показано мгновенное направление токов в катушках, одинаковое во всех фазах в пределах одного полюсного деления и изменяющееся на обратное при переходе к соседнему, т. е. проделаны те же построения, что и в примере на рис. 3-16. Направления токов в нижних сторонах катушек (пунктирные линии) на рисунке не приведены, так как они зависят от шага обмотки. Для наиболее простого случая при диаметральном шаге ($y=\tau$) лобовые части соединяют стороны катушек, лежащие на расстоянии полюсного деления. На рис. 3-23 показаны катушки обмотки с диаметральным шагом, принадлежащие одной фазе, и соединения этих катушек, при которых сохраняется определенное ранее направление тока их пазовых частей.

Как видно из рисунка, в четырехполюсной двухслойной обмотке катушки каждой фазы образуют четыре катушечные группы, а не две, как в однослойной. Они соединены между собой встречно так, что направление обтекания током каждой из групп при переходе от одной группы к другой меняется.

Отмеченная особенность схемы (число катушечных групп в фазе равно числу полюсов при встречном включении следующих друг за другом в фазе катушечных групп) является закономерностью для всех двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной.

Обмотка остальных фаз строится аналогично. На рис. 3-24 приведена полная схема такой обмотки. Начала фаз $C2$ и $C3$ взяты последовательно через $2q$ пазовых делений по отношению к началу фазы

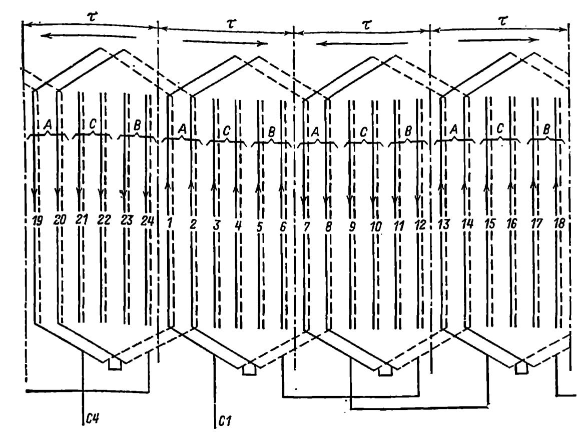


Рис. 3-23. К построению схем двухслойных обмоток.

C1, т. е. через число пазов, соответствующих 120°.

Любое укорочение шага или изменение числа q не меняет принципа построения схемы. При укороченном шаге (рис. 3-24, *б*) меняется только ширина катушек. Все соединения, как междукатушечные, так и межгрупповые, остаются такими же. Сравнивая между собой схемы обмоток с диаметральным и укороченным шагами, следует отметить, что в первом случае в каждом из пазов размещены стороны катушек, принадлежащих одной и той же фазе. При укорочении шага в части пазов размещаются стороны катушек, принадлежащие разным фазам, например в пазах *2, 4, 6, 8* и др. (рис. 3-24, *б*).

Относительное количество таких пазов по сравнению с пазами, занятыми сторонами катушек только одной фазы, зависит от принятого укорочения шага. С уменьшением β оно возрастает. Это является особенностью обмоток с укороченным шагом. В последующих главах будет показано, как необходимо учитывать эту особенность в различных разделах расчета.

Дальнейший анализ схем двухслойных обмоток удобнее проводить с помощью так называемых условных схем. ГОСТ 2.705-70 наряду с развернутыми и торцевыми схемами разрешает использовать условные схемы обмоток, на которых, в отличие от развернутых схем, условными обозначениями показывают не отдельные катушки, а целиком катушечные группы обмотки. Это является логическим продолжением принятого в развернутой схеме упрощенного изображения катушки одним контуром, независимо от действительного числа витков в ней, так как все витки в катушечной группе соединяются между собой только последовательно.

Рисунок 3-25 является условной схемой обмоток, развернутые схемы которых изображены на рис. 3-24. В каждом прямоугольнике, обозначающем катушечную группу, выше диагонали проставлен порядковый номер катушечной группы

(начиная с первой группы 1-й фазы) в последовательности расположения их по пазам статора, а ниже диагонали указано количество катушек в данной катушечной группе. Последняя запись введена, чтобы иметь возможность использовать условные схемы для обмоток с

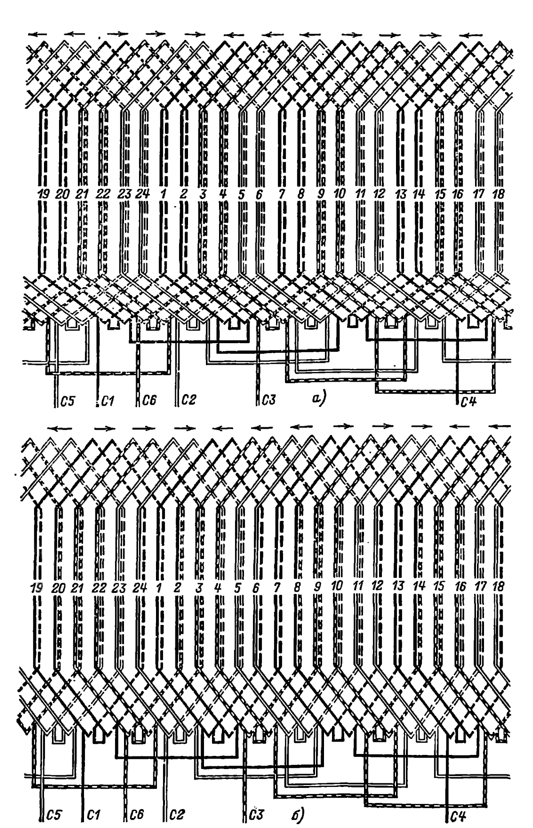


Рис. 3-24. Схемы двухслойных обмоток, $Z=24$, $2p=4$.
а — с диаметральным шагом; б — с укороченным шагом.

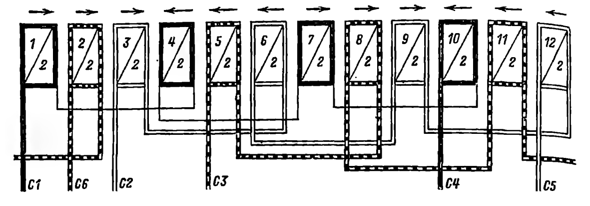


Рис. 3-25. Условная схема обмотки, $Z=24$, $2p=4$, $q=2$, $y=5$

дробными числами пазов на полюс и фазу. На условной схеме конкретной обмотки должно быть указание о шаге обмотки, так как и при диаметральном и при укороченном шагах условная схема одна и та же.

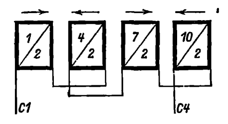


Рис. 3-26. Условная схема первой фазы *А* обмотки рис. 3-25. Вторая и третья фазы соединяются аналогично.

Для облегчения разбора схемы отметим стрелками над прямоугольниками, изображающими катушечные группы, направление обхода их витков током.

Из рис. 3-25 видно, что соединения катушечных групп каждой фазы обмотки полностью идентичны, поэтому то же количество информации о соединениях в обмотке может быть представлено более компактно. ГОСТ 2.705-70 допускает изображение схемы только одной фазы обмотки при соответствующих надписях на чертеже (рис. 3-26).

Такие схемы ясно показывают специфику межгрупповых соединений в обмотке, практически формирующих нужную полюсность при заданном числе параллельных ветвей, и позволяют рассматривать не отдельные схемы обмоток с различными числами Z и q, а представлять их в виде типовых схем для любых Z при определенной полюсности.

Рассмотрим некоторые схемы двухслойных обмоток с различным числом параллельных ветвей. На рис. 3-27, *а* приведена условная схема двухполюсной машины (одной ее фазы), определяющая соедине-

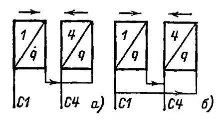


Рис. 3-27. Схемы соединения фазы обмотки с $2p=2$ при различном числе параллельных ветвей.

а — при $a=1$; *б* — при $a=2$.

ния катушечных групп при $a=1$. Направление обхода катушечных групп током, условно определяющее полярность полюсов, как и ранее, показано стрелками. При изменении числа параллельных ветвей полярность полюсов, образованных катушечными группами, не должна меняться, поэтому не должны менять своего направления и стрелки над прямоугольниками на схеме обмотки. Обмотку двухполюсной машины можно выполнить и при $a=2$. Условная схема такой обмотки ($2p=2$, $a=2$) показана на рис. 3-27, *б*. Как видно, межгрупповые соединения изменены таким образом, что катушечные группы обмотки образуют две параллельные ветви, но полярность полюсов остается прежней.

На рис. 3-26 была показана схема обмотки при $2p=4$, $a=1$, а на рис. 3-28, *а* приведена схема обмот-

ки той же полюсности, но при $a=2$. Полярность катушечных групп в обеих схемах одна и та же. На рис. 3-28, *б* дана схема той же обмотки, но при $a=4$. Условия сохранения полярности катушечных

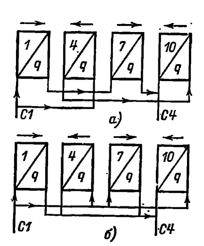


Рис. 3-28. Схема соединения фазы обмотки с $2p=4$ в несколько параллельных ветвей.

а — при $a=2$; *б* — при $a=4$.

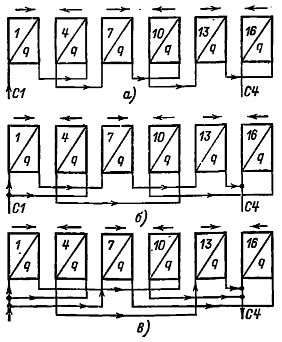


Рис. 3-29. Схемы соединения фазы обмотки с $2p=6$ в несколько параллельных ветвей.

а — $a=1$; *б* — $a=2$; *в* — $a=3$.

групп соблюдены и при четырех параллельных ветвях.

Аналогичные варианты схем обмоток при нескольких параллельных ветвях для шестиполюсной машины приведены на рис. 3-29. Для $a=2$ и $a=3$ возможны иные, чем приведенные на рисунке, варианты соединений, при которых полярность катушечных групп остается правильной.

Принцип построения схем обмоток с большими числами пар полюсов и другими возможными числами параллельных ветвей остается таким же и дальнейших пояснений не требует.

3-8. ОБМОТКИ С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Анализ выражения (3-8), определяющего коэффициент распределения, показывает, что амплитуда высших гармонических в кривой ЭДС обмотки зависит от угла между векторами ЭДС отдельных катушек. В обмотке с целым q этот угол всегда равен пазовому углу:

$$\alpha_z = \frac{2p\pi}{Z} = \frac{\pi}{mq}, \qquad (3\text{-}10)$$

поэтому для уменьшения $k_р$ высших гармоник необходимо увеличить число q. Но с увеличением q растет число пазов и соответственно уменьшаются зубцовые деления, ширина зубцов и пазов. Это ограничивает наибольшие допустимые значения q, так как, во-первых, в узких пазах резко ухудшается заполнение паза медью и использование зубцовой зоны становится неэффективным и, во-вторых, ширина зубцов не может быть взята меньше предельной, определяемой их допустимой механической прочностью.

Как видно из табл. 3-13, заметное уменьшение $k_р$ большинства высших гармоник происходит уже при $q=3$, однако при этом, как было показано в § 3-5, $k_р$ для гармоник зубцовых порядков остается таким же, как и для основной гармоники. Чтобы повысить порядок зубцовых гармоник и тем самым уменьшить их амплитуду и влияние на характеристики машины, стремятся увеличить число пазов на полюс и фазу q до 4—5 и более. Это легко достижимо в машинах с $2p=$ $=2$ или 4. Для машин с $2p=6$ или 8 при сравнительно небольших диаметрах статора выполнение $q=$

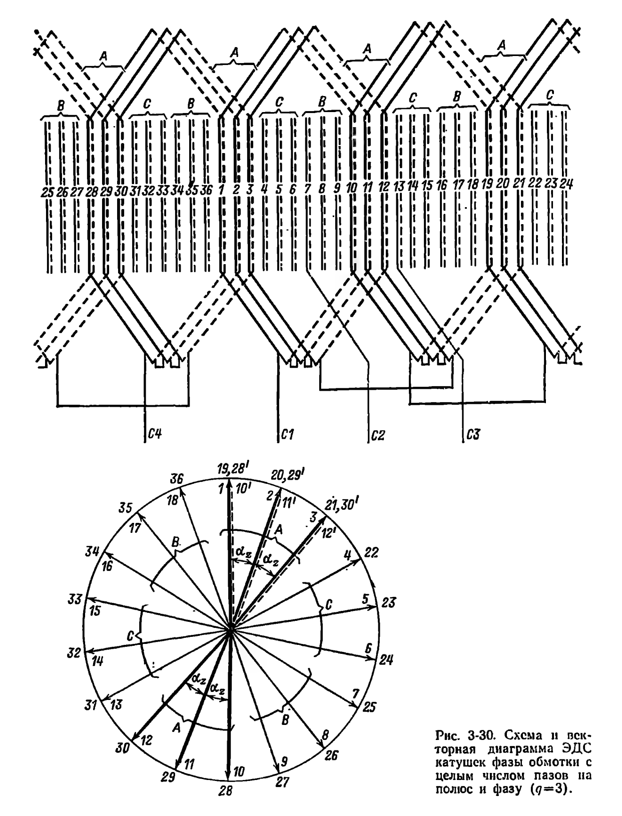


Рис. 3-30. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу ($q=3$).

$=4\div5$ затруднено, а в машинах с большей полюсностью, особенно в тихоходных с $2p=30\div40$ и более, вообще невозможно, так как даже при $q=4$ в таких машинах необходимо выполнить более 300—400 пазов.

В этих случаях для улучшения кривой поля в воздушном зазоре применяют обмотку, в которой число катушек в катушечных группах не одинаково, а периодически меняется. При этом относительное положение векторов ЭДС катушек различных катушечных групп фазы меняется по сравнению с обмоткой, в которой число катушек во всех катушечных группах постоянно, и

угол между векторами ЭДС катушек после соединения схемы становится меньше, чем α_z. Среднее число q при этом получается дробное и обмотки называют «обмотками с дробными q». Для того чтобы оценить преимущества применения обмоток с дробным q, рассмотрим более подробно процесс формирования поля в машинах с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу.

На рис. 3-30 приведены схема-развертка фазы A четырехполюсной обмотки с $q=3$ и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы. Числами на окружности обозначены номера пазов статора. Внутренний ряд цифр соответствует пазам, в которых лежат стороны катушек, образующих первую пару полюсов (двойное полюсное деление занимает электрический угол 360°), наружный ряд цифр — пазам второй пары полюсов.

Условимся, что вектор ЭДС первой от начала отсчета катушки направлен от центра диаграммы к отметке на окружности, соответствующей первому пазу, и присвоим этой катушке номер 1. Тогда векторы ЭДС всех последующих катушек обмотки будут направлены на отметки, соответствующие следующим номерам пазов согласно принятому порядку отсчета — по часовой стрелке.

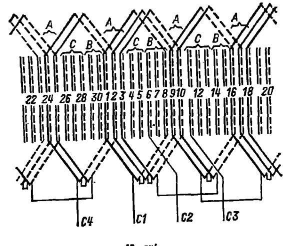
В рассматриваемой схеме $\alpha_z = 180°/mq = 180°/3 \cdot 3 = 20°$. Согласно схеме обмотки три первые катушки ($q=3$) образуют первую катушечную группу фазы A и векторами их ЭДС будут векторы *1*, *2* и *3*. Далее по обходу окружности векторной диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй и третьей катушечных групп, принадлежащих фазе C (векторы *4*, *5*, *6*) и фазе B (векторы *7*, *8*, *9*). Векторы *10*, *11* и *12* являются векторами ЭДС катушек четвертой катушечной группы, принадлежащей фазе A, а следующие за ними (с *13* по *18*) — векторами пятой и шестой катушечных групп (фаз C и B). На этом обход первых двух полюсных делений заканчивается. При обходе следующего двойного полюсного деления картина полностью повторяется.

Первая и четвертая катушечные группы, принадлежащие фазе A, в схемах двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной всегда включены встречно. Поэтому векторы катушек четвертой катушечной группы на векторной диаграмме должны быть повернуты на 180°. Повернутое положение этих векторов показано на диаграмме пунктиром, а их номера обозначены прежними цифрами, но со штрихом (10′, 11′, 12′). Повернутые векторы полностью совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы. При обходе следующего двойного полюсного деления такое положение сохранится. В общем случае совпадение векторов ЭДС сходных катушек включенных встречно катушечных групп одной фазы сохранится при любом числе пар полюсов и любом целом числе q, так как сходные катушки двух соседних катушечных групп фазы всегда располагаются по окружности зазора на расстоянии $3q$ пазовых делений, образующих центральный электрический угол $\alpha = 3q = 180°$.

Таким образом, в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек фазы после соединения обмотки определяется количеством катушек в катушечной группе, которое для всей обмотки постоянно и равно q. Следовательно, коэффициент распределения таких обмоток зависит только от q.

Следует также отметить, что в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек может быть определен на векторной диаграмме по положению векторов ЭДС первой катушечной группы, т. е. процесс формирования обмотки заканчивается после обхода одного полюсного деления по окружности расточки. При дальнейшем обходе векторы ЭДС всех остальных катушек фазы после соединения схемы совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы.

Обмотки с дробным q состоят из катушечных групп с разным числом катушек, поэтому сходные катушки



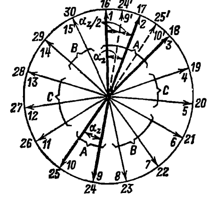


Рис. 3-31. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу ($q=2^1/_2$).

двух соседних групп фазы располагаются по окружности зазора на расстоянии, отличном от $3q$, т. е. не так, как в обмотках с целым q. Следовательно, центральный электрический угол между ними не будет равен 180° и при встречном включении катушечных групп (при повороте векторов ЭДС катушек на 180° на векторной диаграмме) совпадения векторов ЭДС сходных катушек не произойдет.

Рассмотрим схему одной из простейших обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу ($Z=30$, $2p=4$, $m=3$, $q=Z/2pm=30/4 \cdot 3=$ $=2^1/_2$), развернутая схема одной фазы которой и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы приведены на рис. 3-31.

Для расчета и анализа схем обмоток дробное число q обычно выражается в виде неправильной дроби

$$q=b+\frac{c}{d}=\frac{N}{d}, \qquad (3\text{-}11)$$

где b — целая часть дробного q;
c — числитель, а d — знаменатель его дробной части, называемый часто знаменателем дробности q;
N — числитель неправильной дроби, выражающей число q, причем $N=bd+c$.

Применяя эти обозначения для обмотки с $q=2^1/_2$, можем записать: $b=2$; $c=1$; $d=2$; $N=2 \cdot 2+1=5$.

Обратим внимание на некоторые закономерности схемы, характерные для всех обмоток с дробным q. Катушечные группы не могут состоять из дробного числа катушек, поэтому числа катушек в катушечных группах подбирают таким образом, чтобы дробному q соответствовало среднее число катушек в катушечных группах. Для этого катушечные группы в обмотках с дробным q выполняют большими и малыми. В больших катушечных группах на одну катушку больше, чем в малых. Большие и малые катушечные группы чередуются между собой с определенной периодичностью.

Рассматриваемая обмотка состоит из равного числа больших и малых катушечных групп, содержащих соответственно по три и по две катушки каждая (в среднем по $2^1/_2$ катушки). Число катушек в малых катушечных группах всегда равно b, а в больших $b+1$. Чередование больших и малых катушечных групп вдоль зазора записывается рядом цифр, определяющих количество катушек в последовательно расположенных катушечных группах. Для рассматриваемого примера таким рядом будет 32|32|32|... Из этой записи следует, что первой от начала отсчета будет большая катушечная группа, состоящая из трех катушек, затем малая, состоящая из двух катушек, затем опять большая и т. д. Чередование имеет строго определенную для каждой обмотки периодичность. В данной обмотке в каждом периоде (периоды разделены вертикальными линиями) по две катушечные группы и по $2+3=5$ катушек. В общем случае в дробных обмотках в каждом

периоде содержится по d катушечных групп и по N катушек. При этом условии среднее число катушек в катушечной группе за один период будет равно q, так как $N/d=q$.

На рис. 3-31, так же как и в разобранном ранее примере (см. рис. 3-30), толстыми линиями показаны векторы ЭДС фазы A. В первой катушечной группе фазы содержатся три катушки (векторы *1*, *2*, *3*). Далее по обходу окружности диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй катушечной группы, принадлежащие фазе C, их два (*4* и *5*). В третьей катушечной группе (фаза B) три катушки. Векторы их ЭДС на диаграмме *6*, *7* и *8*. Четвертая катушечная группа принадлежит фазе A и содержит две катушки, векторы их ЭДС *9* и *10*. Далее по обходу следуют большая катушечная группа фазы C с тремя катушками (векторы *11*, *12*, *13*) и малая — фазы B (векторы *14* и *15*). На этом обход двойного полюсного деления заканчивается.

При соединении схемы, как всегда в двухслойных обмотках, следующие друг за другом в фазе катушечные группы включаются встречно. Для фазы A это первая и четвертая катушечные группы. Повернув на диаграмме векторы ЭДС четвертой катушечной группы на 180° (новые положения векторов показаны пунктиром, а их номера обозначены *9'* и *10'*), убеждаемся, что в обмотке с дробным q их новое направление не совпадает с направлением векторов ЭДС катушек первой группы, как это было в обмотках с целым q. В данной обмотке при $q=2^1/_2$ они занимают среднее положение, деля угол между векторами ЭДС катушек первой катушечной группы пополам. Действительно, между катушками *1* и *9* заключено восемь зубцовых делений, соответствующих центральному углу $8\alpha_z=8\times24=192°$, и после поворота вектора *9* на 180° между векторами *1* и *9* образуется электрический угол $192-180=12°$, равный $\alpha_z/2$. Таким образом, после соединения схемы векторы ЭДС катушек одной фазы в обмотке с $q=2^1/_2$ располагаются со сдвигом между собой на электрический угол $\alpha_z/2$.

Если в обмотке знаменатель дробности числа q будет больше 2 (например, 4 или 5 и т. д.), то электрический угол между сходными векторами последовательных катушечных групп фаз после соединения обмотки будет уменьшаться. В общем случае этот угол составляет $\alpha_z/d=\pi/mqd=\pi/mN$. Поэтому выражение для коэффициента распределения обмоток с дробным q записывается следующим образом:

$$k_р=\frac{\sin\frac{\pi}{2m}\nu}{N\sin\frac{N}{Nm}\nu}. \tag{3-12}$$

Таким образом, применяя обмотку с дробным q, можно получить такие же результаты, с точки зрения подавления высших гармонических, как и при увеличении числа пазов в машине. Это достоинство обмоток с дробным q привело к их широкому распространению в крупных тихоходных машинах переменного тока.

Выбор знаменателя дробности числа q, от которого в основном зависит угол между ЭДС катушек фазы, определяется условиями симметрии обмотки и необходимым числом параллельных ветвей. Обмотка будет симметричной, если общее число катушечных групп фазы, равное $2p$, содержит целое число периодов чередования больших и малых катушек. В каждом периоде содержится d катушечных групп, следовательно, условием симметрии будет кратность чисел катушечных групп в фазе $2p$ числу катушечных групп в периоде d, т. е. $2p/d$ равно целому числу.

При этом число катушек в фазе двухслойной обмотки, равное Z/m, будет кратно числу катушек в периоде N, так как $\frac{2p}{d}=\frac{2p\cdot mq}{d\cdot mq}=\frac{Z}{mN}$ равно целому числу.

Параллельные ветви в обмотках с дробным q могут быть образованы только из катушечных групп, составляющих целое число периодов чередования, так как ЭДС от-

дельных катушечных групп сдвинуты между собой по фазе, а ЭДС больших и малых катушечных групп не равны по амплитуде. При этом условии допустимые числа параллельных ветвей

$$a = 2p/dk, \qquad (3\text{-}13)$$

где k — любое целое число.

Максимально возможное число параллельных ветвей

$$a = 2p/d. \qquad (3\text{-}14)$$

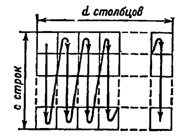


Рис. 3-32. К составлению таблиц чередования катушечных групп в обмотке с дробным числом q.

При составлении схем обмоток, в которых числитель дробной части числа q равен $c=1$ или $c=d-1$, последовательность чередования больших и малых катушек безразлична. Например, для обмоток с $q=2^1/_4$ может быть принято чередование |2223|2223|, или |2232| |2232|, или любое другое, образованное перестановкой этих же цифр. Эти чередования отличаются друг от друга только выбором начальной катушки первой фазы и полностью равноценны.

В других случаях, когда $1<c<<(d-1)$, например в обмотках с $q=2^4/_7$ или $q=4^3/_5$ и т. п., наиболее благоприятное, с точки зрения симметрии обмотки, чередование катушечных групп находят различными способами. Наиболее удобный из них заключается в следующем.

По значениям $q=b+c/d$ составляют таблицу, имеющую c строк и d столбцов (рис. 3-32). В клетки таблицы вписывают числа катушек в катушечных группах. Заполнение таблицы начинают с верхней левой клетки в последовательности, показанной на рис. 3-32 стрелками. Сначала в клетки вписывают числа катушек, содержащихся в больших катушечных группах. Этими цифрами заполняют столько клеток, сколько в периоде чередования содержится больших катушечных групп, т. е. c клеток. Продолжая заполнение таблицы в указанном порядке, вписывают в следующие клетки число катушек, содержащихся в малых катушечных группах, столько раз, сколько их есть в периоде чередования, т. е. $d-c$. Далее опять вписывают числа катушек больших катушечных групп, потом малых и т. д. Вписывание продолжают в той же последовательности, пока все клетки таблицы не будут заполнены. Нужное чередование катушечных групп в периоде читают по строкам заполненной таблицы.

Для пояснения этого метода приведем пример определения возможных чередований больших и малых групп для обмотки с $q=4^3/_5$. В этой обмотке $b=4$, $c=3$, $d=5$.

Составим таблицу, имеющую $c=3$ строки и $d=5$ столбцов. Каждый период чередования катушечных групп обмотки будет содержать $c=3$ большие катушечные группы, состоящие из $b+1=4+1=5$ катушек, и $d-c=5-3=2$ малые катушечные группы, состоящие из $b=4$ катушек каждая. Вписываем в клетки первого столбца, начиная с верхней, три (по числу больших катушечных групп) цифры 5 — число катушек в больших катушечных группах, заполняя весь первый столбец. Далее, начиная с верхней клетки второго столбца, вписываем в две клетки (по числу малых катушечных групп) цифры 4 — число катушек в малых катушечных группах. Далее продолжаем запись, заполняя клетки в указанной последовательности.

5	4	5	4	5
5	4	5	5	4
5	5	4	5	4

По строкам таблицы читаем нужное чередование больших и ма-

лых катушечных групп. Все три строки таблицы показывают одно и то же чередование, изменяется только начало отсчета первой катушечной группы, — следовательно, для построения обмотки можно взять любое из трех, например первую строку |54545|54545|... или вторую строку |54554|54554|...

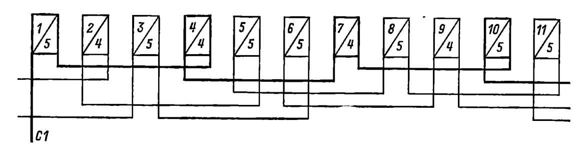


Рис. 3-33. Элементы условной схемы обмотки с $q=4^3/_5$.

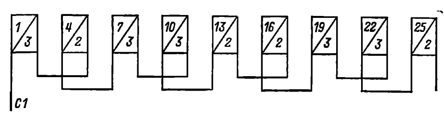


Рис. 3-34. Элемент условной схемы обмотки с $q=2^4/_7$.

Условные схемы для обмоток с дробным q — такие же, как и для обмоток с целым q. Меняются только числа, обозначающие количество катушек в катушечных группах, проставляемые под диагоналями в прямоугольниках. На рис. 3-33 приведена часть условной схемы обмотки с $q=4^3/_5$. Цифры под диагоналями прямоугольников, обозначающих катушечные группы, повторяют найденное в описанном примере чередование больших и малых катушечных групп.

На рис. 3-34 приведена часть условной схемы одной фазы обмотки с $q=2^4/_7$. В период чередования входят $c=4$ большие катушечные группы по $b+1=2+1=3$ катушки в каждой и $d-c=7-4=3$ малые катушечные группы по $b=2$ катушки в каждой. Нужная последовательность расположения катушечных групп в обмотке |3232323| |3232323|.

В практике построения трехфазных обмоток с дробным q избегают применять знаменатель дробности, равный или кратный трем, так как в этом случае симметрия обмотки трехфазных машин нарушается. При необходимости применить обмотку со знаменателем дробности d, равным или кратным трем, следует провести более глубокий анализ возможных вариантов, используя специальную литературу [15, 23].

Начала фаз в обмотках с дробным q, так же как и в обмотках с целым q, должны быть выбраны через $120°k$, т. е. через $120°k/\alpha_z = 2qk$ пазовых делений, где k — целое, не кратное трем число. Однако при дробном q произведение $2qk$ не при всяком k будет равно целому числу пазовых делений (за исключением обмотки, в которой $d=2$). Поэтому в обмотках с дробным q при определении положения начал фаз множитель k необходимо брать таким, чтобы произведение $2qk$ было равно целому числу. При этом k не должно быть кратным трем. Наименьшее возможное расстояние в пазовых делениях между началами фаз будет:

при d четном

$$2qk = \frac{2N}{d}\,\frac{d}{2} = N; \qquad (3\text{-}15)$$

при d нечетном

$$2qk = \frac{2N}{d}\,d = 2N. \qquad (3\text{-}16)$$

Отличия в выборе расположения начал фаз в обмотках с целым и дробным q в ряде методик по проектированию не отмечается, и начала фаз ошибочно определяют со сдвигом на $2q$ пазовых деления для любых типов обмоток. В таких случаях в кривой МДС обмоток с дробным q образуется некоторая несимметрия.

3-9. СХЕМЫ ОБМОТОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УКЛАДКИ

Современные обмоточные станки работают либо по принципу поочередной укладки каждого проводника в пазы статора по шагу обмотки, либо протягивания в пазы с торца статора одновременно пучка проводников, принадлежащих одной или нескольким катушечным группам. И тот и другой способ применимы только для обмоток, не требующих при укладке подъема шага, т. е. временного подъема из пазов сторон первых уложенных катушек. Кроме того, более прогрессивный способ механизированной укладки протягиванием катушечных групп с торца статора применим только для обмоток из концентрических катушек. Этим требованиям полностью удовлетворяют однослойные концентрические обмотки. Двухслойные обмотки, схемы которых рассмотрены выше, требуют при укладке обязательного подъема шага. Поэтому в последние годы для механизированной укладки разработан ряд новых схем, при которых обмотки, сохраняя их симметричность, можно укладывать без подъема шага, как и однослойные, и в то же время выполнять их с укорочением шага, как двухслойные. К наиболее распространенным видам таких обмоток относятся одно-двухслойные и двухслойные концентрические.

Одно-двухслойная обмотка (рис. 3-35) представляет собой сочетание однослойной и двухслойной. В обычной двухслойной обмотке с укорочением шага при $\beta \geqslant 2/3$ в ряде пазов располагаются стороны катушек, принадлежащие одной и той же фазе (см., например, рис. 3-24, *б* — пазы *1*, *7*, *13* и др.), а в других пазах размещены стороны катушек разных фаз. В одно-двухслойных обмотках в пазах, в которых расположены стороны катушек одной и той же фазы, помещают однослойную катушку (большую) с двойным числом витков, а в остальных пазах — в два слоя стороны катушек разных фаз. Обмотка выполняется концентрическими катушками. Число катушечных групп равно числу полюсов. Катушечная группа обычно состоит из одной большой и $q-2$ малых катушек (всего $q-1$ катушка). Шаг большой катушки равен $y_б=\tau-1$, шаги малых катушек $y_{м1}=y_б-2$; $y_{м2}=y_б-4$; $y_{м3}=y_б-6$...

Такая обмотка выполнима только при $q>2$. При $q=2$ она превращается в концентрическую

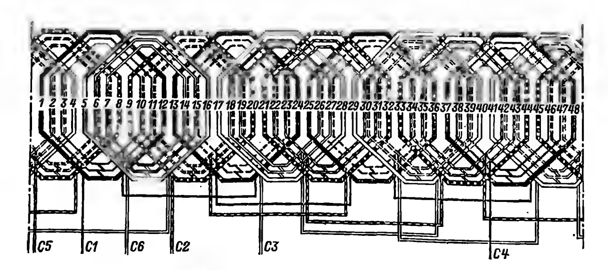


Рис. 3-35. Схема одно-двухслойной обмотки, $Z=48$, $2p=4$, $q=4$.

однослойную обмотку, выполненную вразвалку.

Анализ векторных диаграмм пазовых ЭДС одно-двухслойной обмотки показывает, что ее обмоточный коэффициент, так же как и у двухслойных обмоток, можно представить в виде произведения $k_{об}=k_p k_y$. Коэффициенты распределения k_p и укорочения k_y рассчитываются по обычным для двухслойных обмоток формулам (3-4) и (3-6). Расчетное укорочение шага одно-двухслойной обмотки, выполненной с одной большой катушкой в каждой катушечной группе, равно:

$$\beta=\frac{2}{3}\frac{q+1}{q}. \qquad (3\text{-}17)$$

Следует отметить, что β в данной обмотке определяется только числом q и не может быть изменено. Это значение β используется как при расчете k_y, так и при определении коэффициентов K'_β и K_β, используемых для расчетов параметров электрических машин (см. гл. 6 и 7).

Одно-двухслойная обмотка может быть выполнена также и с двумя большими катушками в каждой катушечной группе. В этом случае общее число катушек в катушечной группе будет q—2, а расчетное укорочение определится из выражения

$$\beta=\frac{2}{3}\frac{q+2}{q}. \qquad (3\text{-}18)$$

Такая схема применима только при $q>4$.

Схема двухслойной концентрической обмотки (рис. 3-36) строится на базе обычной двухслойной обмотки с тем же числом $2p$ и q и отличается от нее соединениями в лобовых частях и шагом катушек. Катушечные группы этой обмотки выполнены из концентрических катушек. Шаг наибольшей катушки равен числу пазовых делений, заключенных между первой и последней сторонами катушек одной катушечной группы базовой двухслойной обмотки. Принцип построения обмотки ясен из сравнения схем, изображенных на рис. 3-

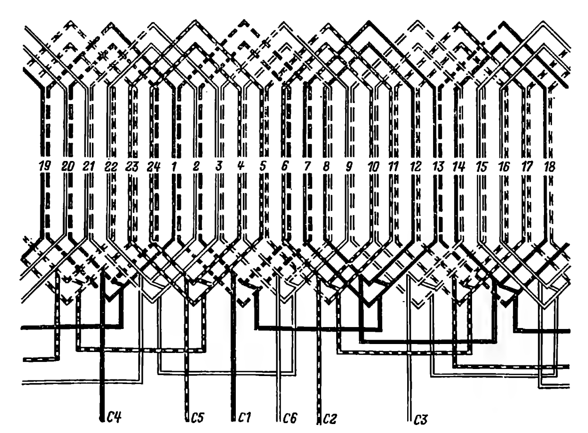


Рис. 3-36. Схема двухслойной концентрической обмотки, $Z=24$, $2p=4$, $q=2$.

36 и 3-24, *б*. Определенная последовательность укладки катушечных групп концентрической обмотки позволяет за несколько переходов уложить на обмоточном станке все катушки без подъема сторон.

Коэффициенты распределения и укорочения двухслойной концентрической обмотки равны соответственно $k_р$ и $k_у$ базовой двухслойной обмотки. Например, расчетное укорочение концентрической двухслойной обмотки, схема которой изображена на рис. 3-36, так же как и в обмотке на рис. 3-24, *б*, равно $\beta=5/6$, а $q=2$.

Катушечные группы уложенной на станке концентрической обмотки не полностью идентичны из-за различного положения сторон их катушек в пазах. Это приводит к некоторому неравенству индуктивных сопротивлений различных катушечных групп. Поэтому концентрическая обмотка может быть соединена в несколько параллельных ветвей только при условии, если в каждой из них будет содержаться одинаковое число катушечных сторон, расположенных в нижних и верхних частях пазов. Это дополнительное условие несколько ограничивает возможность образования параллельных ветвей.

Концентрическая обмотка имеет несколько меньшие вылеты лобовых частей, чем обычная двухслойная, что уменьшает среднюю длину витка, а следовательно, массу обмоточной меди и осевую длину обмотанного статора.

3-10. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

По своей конструкции и схемам соединения обмотки фазных роторов асинхронных двигателей несколько отличаются от обмоток статоров машин переменного тока. В роторах машин мощностью до 80—100 кВт обычно применяют двухслойные катушечные обмотки.

Конструктивно они отличаются от статорных только расположением лобовых частей и наличием бандажей на лобовых частях. В схемах отличие состоит в выборе начал фаз обмотки. Если расстояние между началами фаз обмотки статора выбирается минимально возможным для обеспечения большей компактности расположения выводных концов, то в обмотке ротора их стремятся расположить равномерно по окружности, чтобы не нарушать симметрию расположения массы ротора относительно его оси.

С увеличением размеров машины уменьшается число витков в обмотке статора. Соответственно должно уменьшиться и число витков обмотки ротора, так как иначе напряжение на контактных кольцах возрастает, что может послужить причиной пробоя изоляции во время пуска машины. Поэтому в машинах средней и большой мощности катушечную обмотку ротора, при которой в каждом пазу размещено несколько эффективных проводников, заменяют стержневой, имеющей всегда два проводника в пазу. Число витков в фазе обмотки при этом уменьшается, а фазный ток возрастает. Поэтому сечение каждого стержня выполняют много бо́льшим, чем сечение проводников обмотки статора.

Стержневую обмотку ротора, как правило, делают волновой, так как в волновой обмотке меньше межгрупповых соединений, которые технологически трудновыполнимы при большом сечении проводников.

Основные закономерности соединений схем волновых обмоток рассмотрим на примере. Составим волновую схему стержневой обмотки фазного ротора, имеющего число пазов $z_2=24$ и число полюсов $2p_2=4$. На рис. 3-37, *а* показаны 24 линии пазов, в которых расположены проводники верхнего слоя обмотки. Разметим эти пазы по фазам, предварительно определив в пазовых делениях полюсное деление $\tau_2=Z_2/2p_2=24/4=6$ и число пазов на полюс и фазу $q_2=Z_2/2p_2m_2=24/(4\cdot3)=2$. Стрелками

на линиях укажем для фазы A направления токов в стержнях (одинаковые в пределах каждого полюсного деления и меняющиеся на обратные при переходе на соседние полюсные деления) и начнем построение схемы обмотки, приняв за начало фазы A верхний стержень, лежащий во втором пазу. Обмотку выполняют с диаметральным шагом. В данной схеме шаг обмотки по пазам $y=\tau_2=6$ зубцовых делений. Обмотка двухслойная, поэтому верхний стержень из паза 2 должен быть соединен с нижним стержнем паза $2+y=2+6=8$. Далее нижний стержень паза 8 соединяется с верхним стержнем паза $8+y=8+6=14$ и т. д. Одновременно с вычерчиванием схемы целесообразно записывать последовательность шагов обмотки (рис. 3-37, б).

Проделав таким образом $2p_2-1=4-1=3$ шага, убеждаемся, что при следующем, четвертом (по числу полюсов) шаге обмотка замкнется сама на себя, так как $2p_2\tau_2=Z_2$. При построении схемы этот шаг укорачивают или удлиняют на одно зубцовое деление, т. е. делают его равным $y-1$ или $y+1$. Наиболее употребителен укороченный шаг, так как он приводит

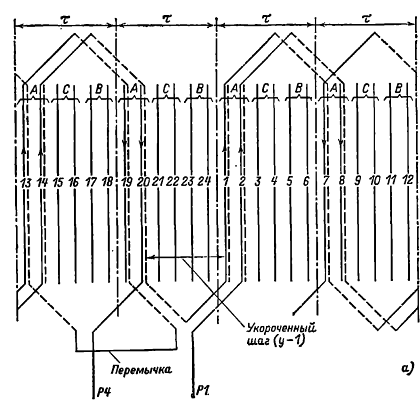




Рис. 3-37. К построению схемы волновой стержневой обмотки фазного ротора асинхронного двигателя.

к некоторой экономии меди обмотки. При удлиненном шаге возникают дополнительные перекрещивания лобовых частей стержней верхнего и нижнего слоев у выхода из пазов.

Укороченным (или удлиненным) шагом завершается первый

В примере за начала фаз приняты верхние стержни, расположенные в пазах *2*, *10* и *18* (рис. 3-38). Рассмотренная обмотка является типичной для стержневых роторных обмоток.

Отметим некоторые особенности обмоток данного типа. В стерж-

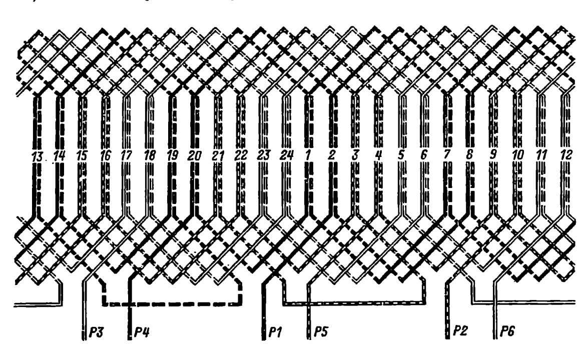


Рис. 3-38. Схема волновой стержневой обмотки ротора с $Z=24$, $2p=4$, $q=2$.

обход обмотки по окружности ротора. После q_2 таких обходов (в рассматриваемом примере после двух обходов) изменение последнего шага производить нельзя, так как это приводит обмотку данной фазы к стержням соседней. Для соединения оставшихся после первых q_2 обходов стержней фазы последний стержень, на котором закончился обход, соединяют перемычкой со стержнем, занимающим такое же положение в пазу на расстоянии шага от него в направлении, обратном обходу, т. е. нижний стержень паза *19* соединяется с нижним стержнем паза 19—6=*13*. Далее продолжают обход в том же порядке, но изменив его направление. Построение обмотки заканчивается после q_2 обходов в обратном направлении.

Начала других фаз обмотки располагают симметрично через $2q_2p_2$ пазовых деления, т. е. через $^1/_3$ окружности ротора (см. § 3-4).

невой волновой обмотке имеется только по одной перемычке на фазу независимо от числа полюсов, в то время как в катушечных двухслойных обмотках необходимо установить $2p-1$ аналогичных перемычек (межгрупповых соединений) на каждую фазу. Это обстоятельство существенно облегчает соединение схемы, особенно в многополюсных машинах.

При симметричном расположении начал фаз так же симметрично располагаются перемычки и концы фаз. Если за начала фаз приняты верхние стержни пазов, то концами фаз также будут верхние стержни, а перемычки соединяются с нижними стержнями.

Волновую стержневую обмотку выполняют с одной и реже с двумя параллельными ветвями. Образование большего числа параллельных ветвей технологически сложно. Для получения двух параллельных ветвей перемычку между по-

ловинами фаз удаляют и каждую часть обмотки соединяют с начальным и конечным выводами фазы, сохраняя в них направление тока.

В большинстве случаев стержневые волновые обмотки роторов выполняют с целым числом пазов на полюс и фазу. Однако на практике встречаются обмотки и с дробным q_2. При $q_2=b+c/d$ полюсное деление $\tau_2=m_2q_2$ содержит дробное число пазовых делений (обмотки с d, кратным трем, в трехфазных машинах не применяют) и шаг обмотки не может быть выполнен диаметральным. Такие обмотки выполняют с различными шагами: большими, равными $y'=\tau_2+\varepsilon_1$ пазовых делений, и малыми, равными $y''=\tau_2-\varepsilon_2$ пазовых делений, где ε_1 и ε_2 — наименьшие дробные числа, при которых y' и y'' выражаются целыми числами. Количество больших и малых шагов, а также последовательность их соединений в схеме зависят от

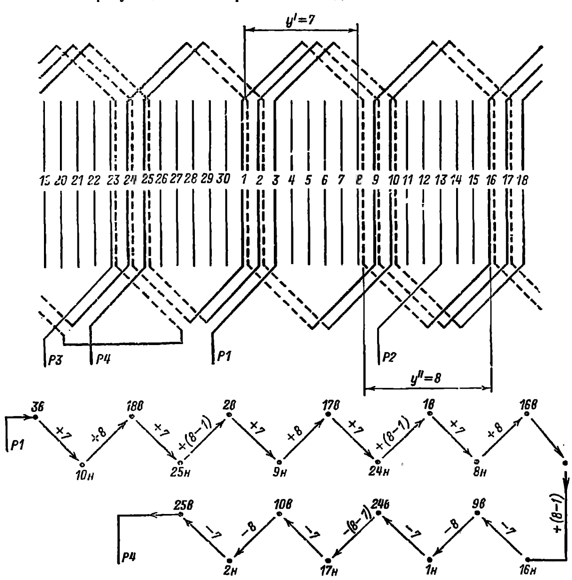


Рис. 3-39. Схема и последовательность соединения стержней одной фазы волновой стержневой обмотки ротора с $Z=30$; $2p=4$, $q=2^1/_2$.

числа q_2 и находятся аналогично числу и чередованию больших и малых катушечных групп в двухслойных катушечных обмотках с дробным q_1. Наиболее часто дробные обмотки фазных роторов выполняют при знаменателе дробности $d=2$, т. е. $q_2=2^1/_2$; $3^1/_2$ и т. п. В таких обмотках большие шаги равны $y'=\tau_2+^1/_2$, а малые $y'=\tau-^1/_2$

пазовых делений. Схема обмотки строится так же, как и при целом q_2, но большие шаги чередуются с малыми. Последовательность чередования шагов до перемычки и после меняется на обратную.

На примере схемы обмотки с $q_2=2^1/_2$, приведенной на рис. 3-39, видно, что две (прямая и обратная) ветви обмотки располагаются таким образом, что в каждой фазной зоне занято стержнями фазы $q_2=2+^1/_2$ паза (либо три верхние половины паза и две нижние, либо наоборот). В оставшейся свободной половине паза размещается стержень, принадлежащий соседней фазе.

Находят применение также некоторые модификации рассмотренных схем обмоток ротора. Иногда в схемах выполняют укороченные переходы при обходе ротора в одну сторону и удлиненные — в другую. В таких схемах перемычки смещаются на несколько пазовых делений, поэтому конструктивно выводные концы фаз не пересекаются с перемычками, что облегчает крепление лобовых частей. Возможно также построение схемы без перемычек. Это достигается установкой в каждой фазе «косого» стержня, т. е. изогнутого по длине стержня, лежащего одной половиной в верхней, а другой — в нижней части паза. «Косой» стержень устанавливается на место последнего при прямом обходе обмотки стержня, который в обычной обмотке соединяется с перемычкой.. После него обход проводится в обратном направлении (как после перемычки). В такой обмотке концы фаз размещаются на противоположной от начал стороне ротора. Отсутствие перемычек и размещение выводов на разных торцах ротора несколько упрощает обмоточные работы. Однако установка «косых» стержней приводит к некоторой асимметрии МДС обмотки, вызывающей дополнительную вибрацию и шумы при работе машины. Это обстоятельство, а также сложность обеспечения надежной изоляции и закрепления «косых» стержней в пазах не позволяют широко применять такие схемы.

3-11. ЯКОРНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

По схеме соединения проводников обмотки якоря машин постоянного тока разделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые, сложные волновые и лягушачьи. Свое название петлевые и волновые обмотки получили по форме, которую они образуют при последовательном соединении секций; первые имеют форму петель, вторые — форму волн.

В простых петлевых обмотках начала и концы секций присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам, в сложных петлевых — к коллекторным пластинам, отстоящим друг от друга на 2, 3, ..., m коллекторных делений. В волновых обмотках начала и концы секций присоединяются к коллекторным пластинам, расположенным на расстоянии K/p (где K — число коллекторных пластин) друг от друга, и через полный обход по якорю конец последней секции соединяется с коллекторной пластиной, отстоящей от первой на одно коллекторное деление в простых волновых, и на 2, 3, ..., m коллекторных делений в сложных волновых обмотках. Лягушачьи обмотки состоят из комбинации простых петлевых и сложных волновых обмоток.

По числу слоев в пазу обмотки машин постоянного тока выполняются, как правило, двухслойными, лягушачьи — четырехслойными.

При числе эффективных проводников обмотки якоря, равном N, и числе витков в каждой секции w_c число секций S равно:

$$S=N/2w_c. \qquad (3\text{-}19)$$

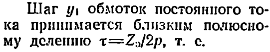
Так как каждая секция соединяется с двумя коллекторными пластинами и при двухслойной обмотке к каждой коллекторной пластине присоединяются концы двух секций, то число коллекторных пластин

должно быть равно числу секций S:

$$K = S. \qquad (3\text{-}20)$$

В лягушачьей обмотке к коллекторной пластине присоединяются концы четырех секций.

При составлении схемы обмотки необходимо определить ее шаги как по пазам, так и по коллектору.



Шаг y_1 обмоток постоянного тока принимается близким полюсному делению $\tau = Z_э/2p$, т. е.

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon, \qquad (3\text{-}22)$$

где ε — укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина ε является дробной частью отношения $Z_э/2p$, которая

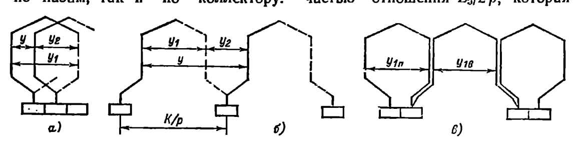


Рис. 3-40. Элементы схемы петлевой (*а*), волновой (*б*) и лягушачьей (*в*) обмоток якоря.

В этом случае удобно пользоваться элементарным числом пазов $Z_э$, так как в пазы с целью улучшения использования зубцовой зоны укладывают, как правило, несколько секционных сторон. Число элементарных пазов $Z_э = Zu_п$, где $u_п$ — число секционных сторон в одном слое паза; Z — действительное число пазов.

Полное число элементарных пазов согласно (3-19) и (3-20)

$$Z_э = S = K. \qquad (3\text{-}21)$$

Для построения схемы обмотки необходимо определить следующие шаги (рис. 3-40):

y_1 — первый частичный шаг, равный числу элементарных пазов по ширине секции;

y_2 — второй частичный шаг, равный числу элементарных пазов между конечной стороной при обходе секции и начальной стороной последующей секции;

y — результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме обмотки; этот шаг также измеряется числом элементарных пазов;

$y_к$ — шаг по коллектору, равный числу коллекторных делений между началом и концом секции.

при знаке — уменьшает его, а при знаке + дополняет до ближайшего целого числа. На рис. 3-41 — 3-43 приведены примеры схем простых петлевых и волновых обмоток.

При укорочении шага обмотки несколько снижается длина вылета лобовых частей и общая длина секции, поэтому чаще всего обмотки выполняются укороченными. Кроме того, это благоприятно влияет и на коммутацию машины.

Для укладки секций обмотки якоря в пазы необходимо определить шаг по пазам, который равен:

$$y_z = y_1/u_п. \qquad (3\text{-}23)$$

Если y_z — целое число, то обмотка является равносекционной, если y_z — дробное — ступенчатой (рис. 3-44). Ступенчатые обмотки более сложны в изготовлении, поэтому их применение должно быть всегда обосновано (например, необходимостью улучшения коммутации машины, сокращения числа штампов в серийном производстве и т. д).

Выбор конкретного типа обмотки для проектируемой машины постоянного тока — задача сложная и не всегда имеющая определенное решение.

Простые волновые обмотки имеют ряд преимуществ перед петлевыми: они не требуют уравнительных соединений, имеют минималь-

ное число параллельных ветвей $2a=2$, что приводит при числе полюсов $2p>2$ к уменьшению числа проводников обмотки якоря и к упрощению технологии обмоточных работ. Увеличение тока параллельной ветви $I_a=I/2a$ приводит к улучшению использования зубцового слоя из-за уменьшения объема изоляции. Но область их применения ограничивается предельным током параллельной ветви и допустимыми значениями напряжения между коллекторными пластинами. Ток параллельной ветви по условиям коммутации, нагрева и технологии обмоточных работ не должен превысить

$$I_a=\frac{I}{2a}\leqslant 250\div 300.$$

Более сложной является задача выбора сложных петлевых и волновых, а также лягушачьих обмоток.

Общими требованиями, предъявляемыми к обмоткам, являются следующие условия симметрии:

1) N/Z = целое число;
2) Z/a = целое число;
3) K/a = целое число;
4) $2p/a$ = целое число,

где a — число пар параллельных ветвей.

Следует отметить, что последнее условие в сложнопетлевых обмотках удовлетворяется только для двукратнозамкнутых обмоток.

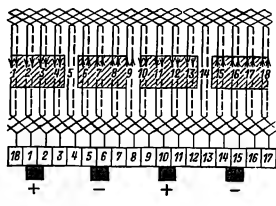


Рис. 3-41. Простая петлевая обмотка, $Z=18$, $2p=4$, $y_1=4$, $y_2=3$.

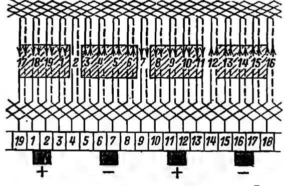


Рис. 3-43. Сложная волновая обмотка $Z=20$, $2p=4$, $m=2$, $y_1=5$, $y_2=4$.

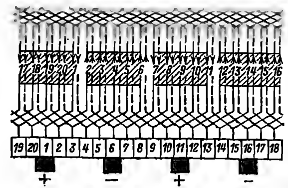


Рис. 3-42. Простая волновая обмотка, $Z=19$, $2p=4$, $y_1=5$, $y_2=3$, $y_к=9$.

Основные данные якорных обмоток и рекомендации по выбору числа пазов приведены в табл. 3-14.

В ряде случаев при выполнении машин постоянного тока приходится на базе готового якоря и коллектора разрабатывать якорь с другими обмоточными данными. В этом случае приведенные выше условия симметрии обмоток не соблюдаются и приходится использовать искусственные приемы для выполнения обмоток.

Первый прием заключается в следующем. Одну секцию не при-

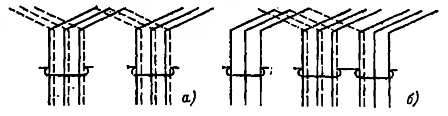


Рис. 3-44. Элементы равносекционной (а) и ступенчатой (б) обмоток.

Таблица 3-14

Основные данные обмоток якоря

Тип обмотки	Число параллельных ветвей	Шаги обмотки y	Шаги обмотки y_1	Рекомендации по выбору Z
Простая петлевая (1)	$2a=2p$	$y=y_к=\pm 1$	$y_1=\frac{K}{2p}\pm\varepsilon$	Z/p — целое нечетное число или $Z/2p$ — целое число + $+1/2$
Сложная петлевая двухходовая (2)	$2a=4p$	$y=y_к^{*}=\pm 2$	$y_1=\frac{K}{2p}\pm\varepsilon$	$Z/p=K/u_пp$ — целое нечетное число. При K — четном числе обмотка двукратнозамкнутая; при K — нечетном числе однократнозамкнутая
Простая волновая (3)	$2a=2$	$y=y_к=\frac{K\mp 1}{p}$	$y_1=\frac{K}{2p}\pm\varepsilon$	$\frac{Z}{2p}=b+\frac{C}{d}$, причем $d=2$; $\frac{2p}{d}$ — целое число
Сложная волновая многоходовая (4)	$2a=2m$**	$y=y_к=\frac{K\mp m}{p}$	$y_1=\frac{K}{2p}\pm\varepsilon$	p/a — целое число; $\frac{K}{u_пa}=\frac{Z}{a}$ — целое число
Лягушачья (5)	$2a=2p\cdot 2m$	$y_{кп}+y_{кв}=\frac{K}{p}$	$y_{1п}+y_{1в}=\frac{K}{p}$; $y_{2п}\pm y_{2в}$	$\frac{Z}{2p}$ — целое число

* $y_к$ — шаг по коллектору.

** m — число ходов обмотки.

соединяют к коллекторным пластинам, хотя и закладывают в пазы для сохранения балансировки. В результате искусственно уменьшается число пазов на единицу (рис. 3-45). Секция *1*, заложенная в пазы и не соединенная с коллекторными пластинами, называется мертвой секцией.

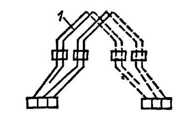


Рис. 3-45. Элемент искусственно замкнутой волновой обмотки с мертвой секцией.

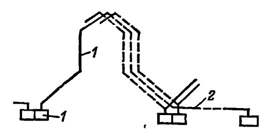


Рис. 3-46. Элемент искусственно замкнутой волновой обмотки с перемычкой.

Второй прием состоит в том, что одна секция (*1*) волновой обмотки (рис. 3-46) заменяется проводником 2, соединяющим предыдущую секцию с коллекторной пластиной, отстоящей от коллекторной пластины *1* на K/p пластин, и, таким образом, обмотка замыкается искусственно.

Несимметричные обмотки с мертвой секцией и искусственно замкнутые в настоящее время практически не применяются.

3-12. УРАВНИТЕЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Даже при соблюдении всех условий симметрии обмоток возможно нарушение равенства ЭДС параллельных ветвей из-за магнитной асимметрии или неравенства сопротивлений щеточного контакта отдельных щеточных болтов. Это приводит к появлению уравнительных токов. Контуры уравнительных токов замыкаются через щеточные контакты (рис. 3-47).

Чтобы уравнительные токи не загружали щеточный контакт, а замыкались внутри обмотки, выполняются специальные уравнительные соединения, связывающие равнопотенциальные точки обмотки якоря.

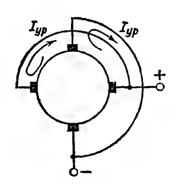


Рис. 3-47. Контуры уравнительных токов.

Теоретически обмотка якоря имеет p равнопотенциальных точек, поэтому шаг уравнительных соединений равен:

$$y_у = K/p. \qquad (3\text{-}24)$$

Полное число уравнительных соединений

$$N_у = K/a. \qquad (3\text{-}25)$$

Размещают уравнительные соединения либо со стороны коллектора, впаивая их в коллекторные пластины, либо со стороны лобовых частей, припаивая их к головкам секции (рис. 3-48). Число уравнительных соединений принимается от одного на один паз до 20% полного числа уравнительных соединений.

Сечение уравнительных соединений принимают равным

$$q_у = (0{,}2 \div 0{,}3)\, q_a \qquad (3\text{-}26)$$

или определяют по формуле

$$q_у = (0{,}1 \div 0{,}15)\, \frac{u_п q_a}{u_у}, \qquad (3\text{-}27)$$

где $u_п$ — число рядов секций в пазу;

$u_у$ — число уравнителей на паз;

q_a — сечение меди одной параллельной ветви.

Для отыскания точек равного потенциала и построения схемы

уравнительных соединений сложных обмоток целесообразно строить векторные диаграммы напряжений [25].

У двухходовых симметричных петлевых обмоток число коллекторных пластин K четное, поэтому один ход обмотки содержит все четные пластины, другой — нечетные. Эквипотенциальные точки первого и второго ходов обмотки расположены на различных сторонах якоря, и для их соединения используют уравнители, проходящие через якорь (рис. 3-48, *г*).

При нечетных K/p и Z/p обмотки являются несимметричными, но в этом случае уравнительные соединения соединяют коллекторные пластины, относящиеся к различным ходам обмотки, и, таким образом, могут быть размещены только на одной стороне якоря. Это обстоятельство оправдывает применение несимметричных сложных петлевых обмоток при $Z/p \geqslant 30$.

В сложных волновых обмотках для выполнения уравнительных соединений с одной стороны якоря необходимо выполнить условие $2p/a$ — целое четное число. Лягушачьи обмотки не нуждаются в уравнительных соединениях, так как каждая из составляющих обмоток по отношению к другой играет роль уравнителя.

3-13. ВИДЫ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ОБМОТОК ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки якоря машин постоянного тока размещаются в пазах магнитопровода. При диаметрах магнитопровода до 200 мм пазы выполняются полузакрытыми овальной формы, зубцы — с параллельными стенками. Это объясняется тем, что обмотка якоря таких машин выполняется всыпной из эмалированных медных проводников круглого сечения, образующих мягкие секции, которые легко можно уложить в пазы через сравнительно узкие шлицы. Сечение паза и изоляции обмоток в пазовой части приведены в табл. 3-15.

При мощности серийных машин постоянного тока свыше 30 кВт обмотки якоря выполняются из прямоугольного обмоточного провода в виде формованных жестких секций. Все секции, принадлежащие одной катушке, изолируются общей пазовой изоляцией.

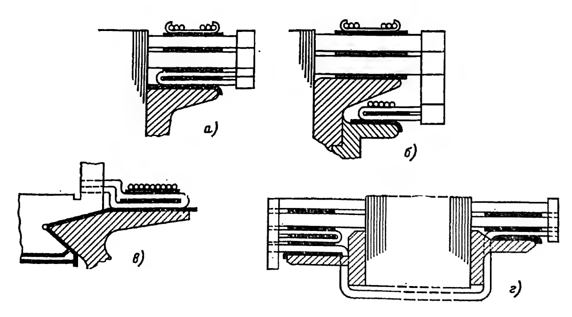
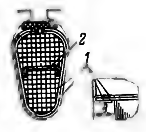


Рис. 3-48. Конструкция уравнительных соединений:

а и *б* — со стороны противоположной коллектору; *в* — со стороны коллектора; *г* — с уравнителями второго рода.

Таблица 3-15

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода; напряжение до 600 В)



Высота оси вращения h, мм	Позиция	Материал				Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
		Наименование			Толщина, мм		
		Класс B	Класс F	Класс H			
		Пленкостеклопласт					
80—112	1	Изофлекс	Имидофлекс		0,35	1	0,35
	2	»	»		0,35	1	0,35
		Пленкостеклопласт					
132—200	1	Изофлекс	Имидофлекс		0,25	2	0,5
	2	»	»		0,25	2	0,5

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

Секции укладываются в открытые пазы прямоугольной формы, что обеспечивает хорошее использование площади паза и снижает трудоемкость обмоточных работ. Пазовая изоляция обмоток с жесткими формованными секциями при открытых пазах выполняется согласно табл. 3-16 — 3-18.

В зависимости от сечения эффективного проводника и типа обмотки на практике нашли применение различные конструктивные исполнения обмоток.

Если секция обмотки выполняются целым проводником, то этот тип обмоток называется катушечным. Катушечные обмотки могут быть одновитковыми и многовитковыми. На рис. 3-49 изображены катушки волновой и петлевой обмоток.

Катушечные обмотки выполняются, как равносекционными, так и ступенчатыми (см. рис. 3-44). Катушечные группы равносекционных обмоток имеют пазовую изоляцию и укладываются целиком в паз. Ступенчатые обмотки более сложны в изготовлении, их применение оправдывается только в крупных машинах с тяжелыми условиями коммутации.

Стержневые обмотки выполняются в виде двух полусекций, концы которых с одной стороны присоединены к петушкам коллекторных пластин, а с противоположной соединяются между собой при помощи хомутиков, надеваемых на отогнутые концы стержней. Этот тип обмоток более трудоемок в изготовлении, однако находит широкое применение в машинах с большим сечением секций, когда их невозможно выполнить целыми проводниками.

Стержни полусекций волновой и петлевой обмоток изображены на рис. 3-50.

Крепление обмоток машин постоянного тока осуществляется при помощи пазовых клиньев в пазовой части и бандажей в лобовых частях. В машинах малой и средней мощности иногда и пазовая часть обмотки крепится при помощи бандажей, которые укла-

Таблица 3-16

Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы открытые, обмотка из прямоугольного провода, $h=225\div315$ мм, напряжение 600 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование, марка: Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм: Класс B	Классы F, H	Число слоев: Класс B	Классы F и H	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине	по высоте при u_c: 1	2	3	4
Пазовая	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий-F	Синтофолий-H	0,15	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	0—6				0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит											
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		.1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)							1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная марки ПМ 0,05×3	0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)							1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 3-17

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная с жесткими формированными катушками из провода марки ПСД; $h=350\div500$ мм; напряжение до 1000 В. Класс нагревостойкости изоляции В)

Часть обмотки	Позиция	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $u_п$ = 2	3	4	5	по высоте
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впритык	0,28	0,28	0,28	0,28	1,12
	3	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	1,12
	4	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
	5	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		Разбухание от пропитки			0,3	0,3	0,4	0,5	0,5
	6	Стеклотекстолит СТ	0,5	1					1,5
	7	То же	0,5	1					0,5
	8	» »	0,5	1					0,5
		Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)			2,14	2,14	2,44	2,54	6,24
Лобовая	9	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	10	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 впритык	0,28	0,28	0,28	0,28	0,56
	11	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	12	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Разбухание от пропитки			0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)			1,54	1,54	1,64	1,74	2,02

Таблица 3-18

Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока **(пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная с жесткими формированными катушками из провода марки ПСД (класс F) и ПСДК (класс H); h=355÷500 мм, напряжением до 1000 В)**

Часть обмотки	Позиция	Материал. Наименование, марка. Класс F	Материал. Наименование, марка. Класс H	Материал. Толщина, мм. Класс F	Материал. Толщина, мм. Класс H	Число слоев. Класс F	Число слоев. Класс H	Двусторонняя толщина изоляции, мм. По ширине при $u_п$ = 2	3	4	5	По высоте
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Полиимидная пленка	ПМ	0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Бумага фенилоновая		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклотекстолит СТЭФ	СТК	0,5		1						0,5
	8	То же	СТК	0,5		1						0,5
	9	» »	СТК	0,5		1						0,5
		Допуск на укладку обмотки						0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)						2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
Лобовая	10	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Полиимидная пленка ПМ		0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)						1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

дываются в выемки на поверхности якоря, как показано на рис. 3-51. В качестве бандажей используется стальная проволока или стеклолента.

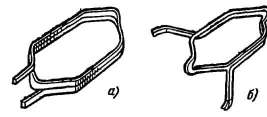


Рис. 3-49. Катушки петлевой (*а*) и волновой (*б*) обмоток.

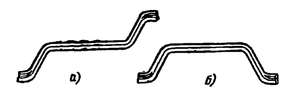


Рис. 3-50. Полусекции волновой (*а*) и петлевой (*б*) обмоток.

Под проволочными бандажами укладывается подбандажная изоляция. Крепление секций обмоток стеклобандажной лентой, пропитанной эпоксидным компаундом, находит в настоящее время применение как в машинах малой мощности, так и в крупных машинах.

Лобовые части обмоток опираются на обмоткодержатели. Перед укладкой обмотки обмоткодержатели изолируются электроизоляционным картоном или стеклобан-

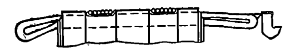


Рис. 3-51. Крепление обмоток при помощи бандажей.

дажной лентой. Обмоткодержатели служат одновременно и в качестве боковых опорных шайб, между которыми зажимаются листы сердечника якоря (см. гл. 8).

Конструктивно уравнительные соединения делаются как в виде колец, к которым отдельными проводниками припаиваются эквипотенциальные точки обмотки, так и в виде вилок, каждая из которых имеет шаг уравнительного соединения $y_1=K/p$. На рис. 3-48 были показаны основные конструктивные схемы размещения уравнительных соединений.

Размеры секций обмоток якоря определяются по чертежу пакета якоря и обмоточным данным. Расчет размеров секций и сопротивлений обмоток якоря приведен в гл. 8.

Глава четвертая

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ. ПАРАМЕТРЫ. ПОТЕРИ

4-1. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Электромагнитное поле электрической машины образуется МДС обмоток статора и ротора, расположенных в пазах магнитопроводов или на сердечниках явно выраженных полюсов. Неравномерность распределения проводников обмотки по объему машины, нелинейность магнитной характеристики и сложность конфигурации магнитопроводов, а также наличие воздушного промежутка между статором и ротором делают точный расчет поля в машине практически невозможным даже при применении современных вычислительных средств. Поэтому при проектировании машины пользуются рядом упрощающих допущений.

Поле в машине подразделяют на главное поле и поле рассеяния. Под главным понимается поле, магнитные линии которого сцеплены с витками как первичной, так и вторичной обмотки. Полем рассеяния называют поле, линии которого сцеплены с витками какой-либо одной из обмоток — статора или ротора.

Магнитные линии главного поля замыкаются по магнитопроводам статора и ротора и пересекают воздушный зазор. Элементы магнито-

проводов и зазоры, по которым проходит главный поток каждой пары полюсов, называют магнитной цепью машины. Расчет магнитной цепи заключается в определении суммарного магнитного напряжения

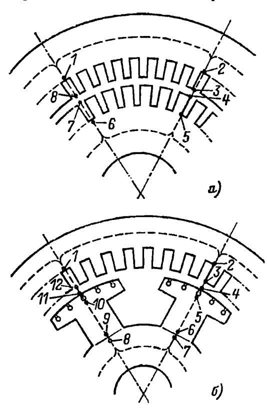


Рис. 4-1. Магнитная цепь машины.

а — с распределенными обмотками; *б* — с явно выраженными полюсами.

всех ее участков, соответствующего определенному значению потока.

В идеальной симметричной машине потоки каждой пары полюсов одинаковы, поэтому при расчете пренебрегают возможной асимметрией потоков реальных машин и рассчитывают магнитную цепь только одной пары полюсов. На поперечном сечении магнитопроводов магнитные линии потока пары полюсов располагаются на секторе, составляющем $1/2p$ часть всего сечения.

На рис. 4-1, *а* представлен сектор машины с распределенными обмотками на статоре и роторе, а на рис. 4-1, *б* — сектор машины с явно выраженными полюсами на роторе. На этих рисунках пунктиром показана средняя линия потока пары полюсов.

В целях упрощения расчета магнитная цепь машины подразделяется на ряд последовательных участков, каждый из которых имеет сравнительно простую конфигурацию и состоит из материала с определенной магнитной характеристикой. Предполагается также, что на участках известно основное направление магнитных линий потока. Для машин с распределенными обмотками на статоре и роторе, например асинхронных, такими участками являются (рис. 4-1, *а*): ярмо статора (участок *1—2*), зубцовые зоны статора (участки *2—3* и *1—8*) и ротора (*4—5* и *6—7*), воздушный зазор (*3—4* и *7—8*) и ярмо ротора (*5—6*). Для машин с явно выраженными полюсами, например синхронных (рис. 4-1, *б*): ярмо статора (участок *1—2*), зубцовая зона статора (*2—3* и *1—12*), воздушный зазор (*3—4*, *12—11*), сердечники полюсов (*4—6* и *9—11*), ярмо ротора (*7—8*). При наличии демпферной обмотки отдельно учитывают участки, соответствующие ее зубцовой зоне (*4—5* и *11—10*). При наличии технологических воздушных промежутков в месте соединения полюсов с остовом ротора добавляются участки, соответствующие этим воздушным зазорам (*6—7* и *8—9*).

Для расчета магнитной цепи используется уравнение полного тока для замкнутой цепи

$$F_ц = \oint H\,dl. \qquad (4\text{-}1)$$

Интеграл берется по контуру вдоль линии потока. Правая часть равенства в соответствии с подразделением на участки представляется в виде суммы

$$F_ц = \sum_{i=1}^{n} H_i l_i, \qquad (4\text{-}2)$$

где n — число участков, на которые подразделена магнитная цепь;

l_i — длина средней магнитной линии в пределах каждого из участков;

H_i — напряженность магнитного поля на i-м участке.

Магнитное напряжение на каждом из участков определяют при-

ближению, при допущении постоянства напряженности поля в пределах границ каждого участка.

Методы расчета магнитных напряжений различных участков имеют особенности, обусловленные размерными соотношениями, характером распределения потока, необходимостью учета влияния потока рассеяния и другими факторами.

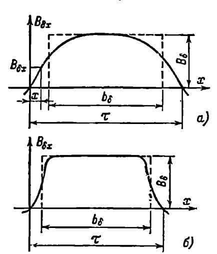


Рис. 4-2. Распределение индукции в воздушном зазоре электрической машины.

а — с распределенными обмотками; *б* — с явно выраженными полюсами.

Ниже приводятся общие для всех рассматриваемых типов машин методы расчета характерных участков магнитной цепи.

Магнитное напряжение воздушного зазора. В воздушном зазоре электрической машины индукция не постоянна. При распределенной обмотке она изменяется по кривой, близкой к синусоиде (рис. 4-2, *а*), а при сосредоточенных обмотках имеет форму, приближающуюся к прямоугольнику (рис. 4-2, *б*). Значение потока на полюсном делении τ определяется как

$$\Phi = l_\delta \int_0^\tau B_{\delta x}\, dx, \qquad (4\text{-}3)$$

где l_δ — расчетная длина воздушного зазора;

$B_{\delta x}$ — индукция в зазоре в точке x.

В практических расчетах электрических машин производить интегрирование неудобно, тем более, что точное аналитическое выражение распределения индукции вдоль дуги полюсного деления получить трудно. Поэтому вводится понятие расчетной полюсной дуги b_δ, на протяжении которой индукция принимается постоянной. Значение b_δ находится из условия равенства потоков

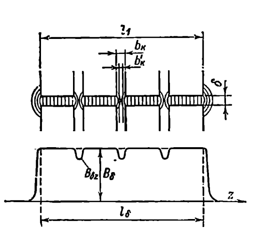


Рис. 4-3. Распределение индукции по длине воздушного зазора.

$$B_\delta b_\delta = \int_0^\tau B_{\delta x}\, dx, \qquad (4\text{-}4)$$

где B_δ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Величина b_δ определяется как часть полюсного деления машины:

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau, \qquad (4\text{-}5)$$

где α_δ — коэффициент полюсного перекрытия; его значение, как следует из определения b_δ, зависит от формы кривой поля в воздушном зазоре.

При синусоидальном распределении индукции по длине полюсного деления неявнополюсных машин

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \approx 0{,}64. \qquad (4\text{-}6)$$

При насыщении зубцов кривая поля уплощается и значение α_δ возрастает. Для средненасыщенных машин значение α_δ лежит в пределах 0,7—0,74, но при больших насыщениях может превышать 0,8.

В машинах с явно выраженными полюсами форма кривой поля зависит от конфигурации, размеров

и вида полюсных наконечников, поэтому расчетная длина полюсной дуги b_δ определяется в зависимости от размерных соотношений полюсных наконечников и зазора. Методы расчета b_δ для машин с явно выраженными полюсами приведены в разделах книги, в которых рассматривается проектирование машин этих типов.

Картина поля в воздушном зазоре в осевой плоскости (рис. 4-3) показывает, что индукция по длине зазора также не одинакова. Против вентиляционных каналов она будет несколько меньше, чем на участках, лежащих против пакетов сердечника. Часть магнитных линий потока замыкается через торцевые поверхности сердечника. Так как в расчетах используется постоянное значение B_δ, то для правильного определения потока через зазор вводится понятие расчетной длины воздушного зазора l_δ, при определении которой учитывается неравномерность распределения B_δ вдоль зазора. Она может быть найдена аналитическим решением, графическим построением по картине поля или аналогично определению b_δ, т. е. из условия

$$B_\delta l_\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{\delta z}\,dz, \qquad (4\text{-}7)$$

определяющего равенство площадей прямоугольника длиной l_δ и высотой B_δ и площади криволинейной фигуры, ограниченной действительной кривой распределения индукции вдоль зазора (рис. 4-3).

Исследования показали, что доля потока полюсного деления, линии которого замыкаются через торцевые поверхности сердечника, зависит в основном от воздушного зазора. В машинах, имеющих малый зазор, например в асинхронных двигателях, эта часть потока незначительна и в расчетах ее не учитывают. В машинах с большими зазорами увеличение расчетной длины воздушного зазора по сравнению с действительной за счет этой части потока принимается равным 2δ.

Влияние провалов в кривой индукции, возникающих над радиальными вентиляционными каналами, учитывается при определении l_δ следующим образом. Действительная ширина радиальных каналов $b_к$ заменяется расчетной $b'_к$, которая зависит от соотношения $b_к/\delta$.

Таким образом, расчетная длина воздушного зазора в общем случае определяется по формуле

$$l_\delta = l_1 - n_к b'_к + 2\delta, \qquad (4\text{-}8)$$

где l_1 — конструктивная длина магнитопровода;

$n_к$ и $b'_к$ — соответственно число и расчетная ширина радиальных вентиляционных каналов.

Для конкретных типов машин эта формула несколько изменяется, что будет показано далее в соответствующих разделах.

С учетом рассмотренных особенностей распределения индукции в воздушном зазоре электрической машины расчетная площадь полюсного деления

$$Q_\delta = \alpha_\delta \tau l_\delta . \qquad (4\text{-}9)$$

Тогда индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{Q_\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} . \qquad (4\text{-}10)$$

Магнитодвижущая сила воздушного зазора между гладкими поверхностями

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta. \qquad (4\text{-}11)$$

В большинстве машин поверхности статора и ротора, ограничивающие воздушный зазор, не гладкие, а имеют различные неровности: пазы, углубления для размещения бандажей и др. Магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии потока сгущаются, а над прорезями пазов плотность линий уменьшается (рис. 4-4). В кривой

индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

Увеличение магнитного напряжения учитывается введением коэффициента воздушного зазора (коэффициента Картера) k_δ. Этот

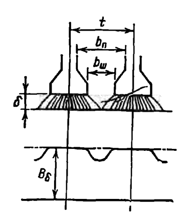


Рис. 4-4. К расчету коэффициента воздушного зазора.

коэффициент, полученный расчетом полей в зазорах с различным соотношением ширины зубцов и пазов, показывает, насколько возрастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора по сравнению с магнитным напряжением зазора между гладкими поверхностями:

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta . \qquad (4\text{-}12)$$

Можно использовать также понятие расчетного воздушного зазора

$$\delta' = \delta k_\delta , \qquad (4\text{-}13)$$

т. е. равномерного воздушного зазора, который имеет магнитную проводимость, равную магнитной проводимости реального воздушного зазора.

Если одна поверхность гладкая, а другая зубчатая, то k_δ достаточно точно определяется по формуле

$$k_\delta = \frac{t}{t - \gamma\delta}, \qquad (4\text{-}14)$$

где

$$\gamma = \frac{(b_ш/\delta)^2}{5 + b_ш/\delta} \qquad (4\text{-}15)$$

либо

$$k_\delta = \frac{t + 10\delta}{b_п + 10\delta} . \qquad (4\text{-}16)$$

Обозначения величин, входящих в формулы, ясны из рис. 4-4.

Формула (4-14) получила наибольшее распространение, так как в ней учитывается ширина шлица $b_ш$, непосредственно влияющая на неравномерность поля. Формула (4-16) используется в основном при открытых пазах.

Коэффициенты воздушного зазора рассчитываются отдельно для зубцов статора ($k_{\delta 1}$) и зубцов ротора ($k_{\delta 2}$). При этом в первом случае предполагается, что поверхность статора зубчатая, а ротора — гладкая, во втором — наоборот, поверхность ротора зубчатая, а статора — гладкая. В формулы (4-14) — (4-16) при определении $k_{\delta 1}$ подставляются значения t_1, $b_{п1}$ и $b_{ш1}$, а при определении $k_{\delta 2}$ — значения t_2, $b_{п2}$ и $b_{ш2}$.

Результирующий коэффициент воздушного зазора машины равен произведению частичных коэффициентов:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \qquad (4\text{-}17)$$

По аналогичным формулам находятся коэффициенты воздушного зазора, учитывающие другие неравномерности, имеющиеся на его поверхности ($k_{\delta 3}, k_{\delta 4} \ldots$).

В этом случае результирующий коэффициент k_δ определяется как произведение всех частичных коэффициентов $k_{\delta i}$, найденных для статора и ротора.

Магнитное напряжение зубцовой зоны. При расчете магнитных напряжений зубцовых зон принимается допущение, что линии равного магнитного потенциала в поперечном сечении машины представляют собой окружности с центром на оси вращения ротора. При этом допущении магнитное напряжение зубцовой зоны статора F_{z1} или ротора F_{z2} определяется разностью магнитных потенциалов между эквипотенциальными поверхностями (на поперечном сечении — окружностями), проходящими по дну пазов и по поверхности головок зубцов.

Обычно рассматривается поле в одном элементе зубцовой зоны — зубцовом (пазовом) делении $t = \pi D/z$. Магнитные сопротивления паза и зубца в магнитной цепи машины соединены параллельно, поэтому поток в зубцовом делении распределяется пропорционально проводимостям магнитных трубок,

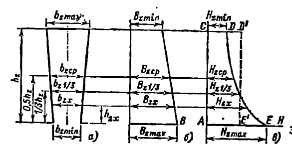


Рис. 4-5. К расчету магнитного напряжения зубцов.

проходящих через зубец и паз. Пазы в электрической машине заполнены проводниками и изоляцией, т. е. средой с абсолютной магнитной проницаемостью μ_0 во много раз меньшей, чем проницаемость стали зубца. Поэтому поток в пазу составляет лишь небольшую часть общего потока в зубцовом делении. Эта часть потока при малом насыщении зубцов мала, и в расчетах ее не учитывают. При увеличении насыщения зубцов она возрастает и ее влияние на F_z начинает сказываться.

Рассмотрим вначале расчет магнитного напряжения зубцовой зоны без учета потока в пазу. При принятом допущении о конфигурации эквипотенциальных линий и в силу симметрии зубцовой зоны магнитные линии, проходящие через середины оснований зубцов, совпадают с отрезками радиусов (см. рис. 4-1, *а* и *б*). Поэтому

$$F_z = \int_0^{h_z} H_{zx}\,dx, \qquad (4\text{-}18)$$

где H_{zx} — напряженность магнитного поля в сечении зубца, соответствующем расстоянию h_{zx} от его узкой части;

h_z — высота зубца (рис. 4-5, *а*).

При постоянном сечении зубца считают, что напряженность поля в нем H_z постоянна. Тогда

$$F_z = H_z h_z. \qquad (4\text{-}19)$$

При переменном сечении зубца F_z можно определить, разделив зубец по высоте на n достаточно малых участков с высотой Δh, в пределах которых изменением H_z пренебрегают. Определив для каждого участка индукцию, напряженность магнитного поля, магнитное напряжение и просуммировав последние, находят магнитное напряжение зубца.

Поток, приходящийся на одно зубцовое деление,

$$\Phi_t = B_\delta t l_\delta. \qquad (4\text{-}20)$$

Если через b_{zx} обозначить ширину зубца на высоте h_{zx}, то соответствующее активное сечение зубца

$$S_{zx} = k_c l_{ст} b_{zx}, \qquad (4\text{-}21)$$

где k_c — коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью;

$l_{ст}$ — длина магнитопровода без вентиляционных каналов.

Индукция в рассматриваемом сечении зубца (рис. 4-5, *б*)

$$B_{zx} = \frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{B_\delta t l_\delta}{k_c l_{ст} b_{zx}}. \qquad (4\text{-}22)$$

Напряженность поля определяется для соответствующей индукции по кривым намагничивания для выбранной марки стали.

Проведя несколько таких расчетов для различных сечений зубца, можно для потока Φ_t построить кривую распределения напряженности поля по высоте зубца (рис. 4-5, *в*). Площадь, ограниченная этой кривой, S_{ACDE} определяется в масштабе магнитного напряжения зубца.

Зубцы в электрических машинах могут иметь сложную конфигурацию, поэтому такие расчеты выполняют лишь на ЭВМ при необходимости получения уточненных данных. При этом для каждой конфигурации зубцов приходится составлять свою программу расчета, учитывающую размерные соотношения зубцовой зоны.

В практических расчетах оказывается достаточным приближенное решение, когда F_z находится по (4-19) для некоторой средней расчетной напряженности H_z и расчетной высоты зубца h_z.

При плавно изменяющихся сечениях зубцов расчетная напряженность H_z достаточно точно находится по формуле

$$H_z = \frac{1}{6}(H_{z\,max} + 4H_{zср} + H_{z\,min}). \tag{4-23}$$

При прямоугольных пазах при $B_{z\,max} \leqslant 2{,}0$ Тл используется распространенный метод расчета F_z по напряженности $H_{z1/3}$, определенной по индукции в сечении на 1/3 высоты зубца от его узкой части (рис. 4-5):

$$F_z = H_{z1/3} h_z, \tag{4-24}$$

дающий хорошее совпадение с уточненными расчетами при небольшой разнице наибольшего и наименьшего сечений зубцов. При этом площадь прямоугольника $CD'E'A$ со сторонами $H_{z1/3}$ и h_z равновелика площади $ACDE$ фигуры.

В отдельных случаях при большей разнице $b_{z\,max}$ и $b_{z\,min}$ и больших насыщениях расчет проводится более детально. Зубец подразделяется по высоте на две части, и для каждой из них определяется средняя напряженность поля указанным методом. В этом случае расчетные сечения берутся на высоте $\frac{1}{3}\frac{h_z}{2} \approx 0{,}2h_z$ и $\frac{1}{3}\frac{h_z}{2} + \frac{h_z}{2} = \frac{2}{3}h_z \approx 0{,}7\ h_z$ от наиболее узкого сечения зубца.

При расчете магнитного напряжения зубцов с резко меняющимся по высоте сечением, например зубцов двухклеточного ротора асинхронного двигателя или короткозамкнутого ротора с фигурными пазами, зубцы также подразделяются по высоте на два участка с плавно изменяющимся сечением, при этом магнитное напряжение зубцов равно сумме магнитных напряжений участков.

Влияние местных изменений сечения зубца на изменение магнитного напряжения, не распространяющихся на большие участки по его высоте (углублений в стенах пазов для крепления пазовых клиньев, расширений в коронках зубцов и т. п.), в практических расчетах обычно не учитывают.

В насыщенной зубцовой зоне доля потока в пазу возрастает. Ее

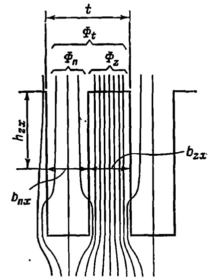


Рис. 4-6. Поток в зубцовом делении при насыщении стали зубцов.

можно оценить, не прибегая к полному расчету поля на зубцовом делении, следующим образом.

Обозначим поток в зубце Φ_z и поток в пазу $\Phi_п$ (рис. 4-6). Тогда поток на зубцовом делении на высоте зубца h_{zx} будет равен:

$$\Phi_t = \Phi_{zx} + \Phi_{пx}. \tag{4-25}$$

Разделив (4-25) на S_{zx} и умножив и разделив второе слагаемое правой части равенства на $S_{пx} = b_{пx} l_\delta$, получим:

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{пx}}{S_{zx}}\frac{S_{пx}}{S_{пx}}, \tag{4-26}$$

откуда

$$B'_{zx} = B_{zx} + B_{пx}\frac{S_{пx}}{S_{zx}}, \tag{4-27}$$

где B'_{zx} — расчетная индукция, определяемая полным потоком в сечении зубца S_{zx} в предположении, что поток в пазу отсутствует;

B_{zx} — действительная индукция в сечении зубца S_{zx};

$B_{пx}$ — индукция в сечении паза $S_{пx}$.

Так как паз заполнен средой с абсолютной магнитной проницаемостью μ_0, то

$$B_{пx} = \mu_0 H_{пx}. \quad (4\text{-}28)$$

На основании принятого допущения о конфигурации эквипотенциальных линий в зубцовой зоне напряженность поля в зубце и в пазу на одной и той же высоте h_{zx} будет одинакова, т. е.

$$H_{пx} = H_{zx}.$$

Тогда из (4-27) и (4-28) имеем:

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} \frac{S_{пx}}{S_{zx}} \quad (4\text{-}29)$$

или

$$B'_{zx} = B_{zx} + \mu_0 H_{zx} k_{пx}, \quad (4\text{-}30)$$

где $k_{пx}$ — коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на высоте h_{zx}:

$$k_{пx} = \frac{S_{пx}}{S_{zx}} = \frac{b_{пx} l_\delta}{b_{zx} l_{ст} k_c}. \quad (4\text{-}31)$$

В машинах нормального исполнения $k_п$ для различных по высоте зубца сечений обычно находится в пределах

$$k_п = 0{,}5 \div 2{,}0.$$

Для определения действительной индукции в каждом сечении зубца первоначально находят расчетную индукцию по полному потоку зубцового деления:

$$B'_{zx} = \frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{B_\delta l_\delta t}{k_c l_{ст} b_{zx}}.$$

После этого, задаваясь значениями B_{zx}, несколько меньшими, чем B'_{zx}, находят подбором действительную индукцию B_{zx} и соответствующее ей значение H_{zx}, при которых удовлетворяется равенство (4-30). Для облегчения расчета в приложении I приведены кривые, позволяющие определить H_{zx} непосредственно по расчетной индукции B'_{zx} с учетом фиксированных значений коэффициента $k_п$.

Численные значения $k_п$ и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м в (4-30) позволяют судить о значениях индукции в зубцах, при которых необходимо учитывать ответвление потока в паз. Для большинства современных электротехнических сталей при индукции $B_z \leqslant 1{,}8$ Тл напряженность поля не превышает $H \leqslant 16\,000$ А/м, следовательно, при этом уровне насыщения действительная индукция в зубцах будет меньше, чем расчетная, лишь на 2—3% даже при боль-

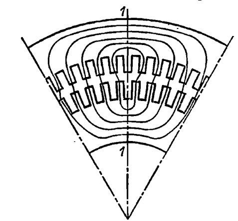


Рис. 4-7. Поток в магнитопроводе электрической машины с распределенными обмотками.

ших значениях $k_п$, поэтому в расчетах этим изменением можно пренебречь.

При индукциях $B_z > 1{,}8$ Тл расчет следует проводить с учетом ответвления потока в паз. Естественно, что вопрос о необходимости такого учета решается при определении индукции в каждом из расчетных сечений в отдельности.

Магнитное напряжение ярм статора и ротора. Распределение потока в ярмах статора и ротора зависит от конструкции машины, размерных соотношений магнитопроводов и уровня насыщения стали. Значение потока в различных сечениях вдоль средней линии ярма не постоянно. При распределенной обмотке, например в асинхронных машинах, наибольший поток в ярмах статора и ротора имеет место в сечении *1—1* (рис. 4-7), так как на этих участках ярма потоки зубцов, находящихся на половине полюсного деления, суммируются. То же происходит в статорах синхронных машин нормального исполнения и якорях машин постоянного тока.

В станинах машин постоянного тока и ярмах явнополюсных рото-

ров синхронных машин поток по длине средней линии меняется мало и его изменением пренебрегают.

Распределение потока по высоте ярма также неравномерно из-за кривизны ярма и некоторого изменения его сечения в местах примыкания полюсов и под основаниями зубцов. Ближе к оси машины индукция в ярме больше, чем на периферии. Неравномерность индукции возрастает с увеличением насыщения стали и уменьшением диаметра сердечника.

Для точного учета влияния этих факторов необходимы трудоемкие расчеты поля с помощью ЭВМ. В практических расчетах удовлетворительная точность достигается либо при использовании специальных кривых намагничивания, построенных для сталей ярм машин с распределенной обмоткой (см. § 6-8), либо введением в расчетные формулы коэффициента ξ, учитывающего уменьшение магнитного напряжения ярма из-за неравномерного распределения потока.

4-2. ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Параметрами электрической машины называют активные и индуктивные сопротивления ее обмоток. К параметрам относят также момент инерции ротора, значение которого входит в уравнение движения ротора электрической машины.

Активное сопротивление обмоток зависит в общем случае от длины проводников обмотки L и площади поперечного сечения проводников $q_{пр}$:

$$r = \rho_\theta \frac{L}{q_{пр}} k_r.$$

Удельные сопротивления ρ_θ некоторых наиболее часто встречающихся в электрических машинах проводящих материалов для различных расчетных температур приведены в табл. 4-1. Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, предельные допустимые превышения температуры которых соответствуют классам нагревостойкости A, E и B, расчетная температура принимается равной 75° С, а для обмоток, предельные допускаемые температуры которых соответствуют классам нагревостойкости F и H, 115° С.

В верхней части табл. 4-1 приведены удельные электрические сопротивления проводниковой меди или неизолированных шин, используемых для фазных обмоток статоров и роторов машин переменного тока, обмоток возбуждения, обмоток машин постоянного тока, короткозамкнутых роторов асинхронных машин со вставными стержнями и демпферных обмоток синхронных машин. В нижней части таблицы приведены удельные сопротивления для расчета сопротивлений литых короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей.

Коэффициент k_r учитывает увеличение активного сопротивления из-за неравномерного распределения тока по сечению проводников. Он представляет собой отношение активного сопротивления проводника с неравномерным распределением тока по сечению к сопротивлению того же проводника при одинаковой во всех точках его сечения плотности тока.

Расчетные формулы для определения L, $q_{пр}$ и k_r приводятся в разделах книги, относящихся к расчету сопротивлений обмоток машин различных типов.

Индуктивное сопротивление обмоток электрических машин определяется их взаимной индуктивностью и собственной индуктивностью. Индуктивное сопротивление взаимной индукции является характеристикой главного поля машины, поток которого сцеплен с витками как первичной, так и вторичной обмотки. Методы расчета индуктивных сопротивлений взаимной индукции различны для разных типов машин. Они рассматриваются в соответствующих главах книги.

Индуктивные сопротивления самоиндукции, или, как их называют, индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, характеризуют поля рассеяния, потоки которых сцеплены с витками каждой из обмоток в отдельности. Методы их расчета для машин различных типов имеют много общего.

Таблица 4-1

Удельное электрическое сопротивление материала проводников обмоток

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м, при температуре, °С		
		20	75	115
Обмотки из медных проводников или неизолированной шинной меди	Медь	$\frac{1}{57}10^{-6}$	$\frac{1}{47}10^{-6}$	$\frac{1}{41}10^{-6}$
Короткозамкнутые роторы асинхронных машин	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35}10^{-6}$	$\frac{1}{28}10^{-6}$	$\frac{1}{26}10^{-6}$
	Алюминий литой	$\frac{1}{30}10^{-6}$	$\frac{1}{14}10^{-6}$	$\frac{1}{22}10^{-6}$

Примечание. Удельное сопротивление алюминия после заливки в пазы машины несколько повышается в связи с образованием некоторого количества раковин (воздушных включений) и изменением структуры при охлаждении в узких пазах. Поэтому в расчетах принимают удельное сопротивление литой алюминиевой обмотки роторов асинхронных машин равным $\frac{10^{-6}}{21,5}$ Ом·м при температуре 75° С и $\frac{10^{-6}}{20,5}$ Ом·м при температуре 115° С.

При расчете индуктивных сопротивлений рассеяния потоки рассеяния каждой из обмоток подразделяют на три составляющие — потоки пазового, лобового и дифференциального рассеяния. Для каждого из этих потоков находят коэффициенты удельной магнитной проводимости, т. е. магнитной проводимости, деленной на условную длину поля рассеяния. Эта длина учитывает ослабление поля в зазоре над радиальными вентиляционными каналами примерно в 2 раза и принимается равной:

$$l'_\delta = l_\delta - 0,5 n_к b_к,$$

где $n_к$ и $b_к$ число и ширина радиальных каналов в сердечнике машины.

По сумме удельных коэффициентов магнитной проводимости находят, как будет показано ниже, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки. Так как расчет коэффициентов проводится всегда на единицу длины, то слово «удельные» обычно опускают.

Рассмотрим последовательно методы расчета коэффициентов магнитной проводимости.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния. Предположим, что в пазу с высотой $h_п$ расположены проводники однослойной обмотки (рис. 4-8). Примем следующие допущения: проводники с током распределены равномерно по всему сечению паза, плотность тока в каждой точке сечения паза постоянна, магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности, магнитные линии потока рассеяния в пазу прямолинейны и направлены нормально к оси паза.

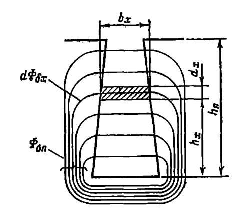


Рис. 4-8. К расчету коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния.

Все рассмотрение будем проводить относительно единицы условной длины l'_δ.

Выделим в пазу на высоте h_x от дна паза элемент высотой dx, представляющий собой трубку потока рассеяния паза. Поток этого элемента на единицу длины обозначим $d\Phi_{\sigma x}$. Создаваемое им потокосцепление с проводниками обмотки N_x, расположенными в пазу ниже выделенного элемента, равно:

$$d\Psi_x = d\Phi_{\sigma x} N_x. \qquad (4\text{-}32)$$

При принятом допущении об отсутствии насыщения стали можно записать:

$$d\Phi_{\sigma x} = \mu_0 F_x d\Lambda_x, \qquad (4\text{-}33)$$

где $d\Lambda_x = dx/bx$ — магнитная проводимость выделенного элемента паза; b_x — ширина паза на высоте h_x.

Учитывая, что $F_x = N_x I$, где I — ток в одном проводнике, из (4-32) и (4-33) получаем:

$$d\Psi_x = \mu_0 I N_x^2 \frac{dx}{b_x}.$$

Потокосцепление всего потока рассеяния паза на единицу его длины со всеми проводниками, расположенными в данном пазу, равно:

$$\Psi_п = \mu_0 I \int_0^h N_x^2 \frac{dx}{b_x}, \qquad (4\text{-}34)$$

откуда индуктивное сопротивление проводников одного паза на единицу длины

$$x'_{\sigma п} = \omega L_п = \omega \frac{\Psi_п}{I} = $$

$$= \omega\mu_0 \int_0^h N_x^2 \frac{dx}{b_x},$$

или

$$x'_{\sigma п} = 2\pi f \mu_0 N_п^2 \int_0^h \left(\frac{N_x}{N_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x}, \qquad (4\text{-}35)$$

где $N_п$ — полное число проводников в пазу.

Интеграл в правой части выражения (4-35) определяет коэффициент магнитной проводимости потока пазового рассеяния с учетом потокосцепления с проводниками паза. Его обозначают $\lambda_{п\Psi}$:

$$\lambda_{п\Psi} = \int_0^h \left(\frac{N_x}{N_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x}. \qquad (4\text{-}36)$$

Так как при расчете индуктивного сопротивления рассеяния учет потокосцепления обязателен, индекс Ψ в обозначении обычно опускают. Тогда

$$x'_{\sigma п} = 2\pi f \mu_0 N_п^2 \lambda_п. \qquad (4\text{-}37)$$

Выразив $N_п$ через число витков фазы (при условии, что обмотка фазы расположена в Z/m пазах), получим выражение для индуктивного сопротивления пазового рассеяния всей фазы с учетом условной длины поля рассеяния:

$$x_{\sigma п} = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{pq} l'_\delta \lambda_п. \qquad (4\text{-}38)$$

Расчетные формулы для определения $\lambda_п$ получают из (4-36) с учетом конфигурации пазов и типа обмотки.

Коэффициент магнитной проводимости прямоугольного паза, полностью занятого проводниками однослойной обмотки,

$$\lambda_п = \int_0^{h_п} \left(\frac{N_x}{N_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x} = \int_0^{h_п} \left(\frac{S_x}{S_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x} =$$

$$= \int_0^{h_п} \left(\frac{h_x}{h_п}\right)^2 \frac{dx}{b_п} = \frac{1}{3}\frac{h_п}{b_п}, \qquad (4\text{-}39)$$

так как в прямоугольном пазу ширина $b_x = b_п$ постоянна и не зависит от высоты, а при принятом допущении о равномерности распределения проводников по площади сечения паза справедливо равенство

$$\frac{N_x}{N_п} = \frac{S_x}{S_п} = \frac{h_x}{h_п},$$

где $S_п$ — площадь поперечного сечения всего паза, а S_x — часть площади сечения паза высотой h_x.

В более сложных случаях, например когда проводники с током занимают не весь паз и конфигурация паза отлична от прямоугольной, коэффициент проводимости пазово-

го рассеяния

$$\lambda_п = \int_0^{h_п} \left(\frac{S_x}{S_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x}, \qquad (4\text{-}40)$$

где $S_п$ и S_x — площади поперечного сечения паза, занятые проводниками обмотки.

Интегрирование проводят по частям паза, причем паз подразделяют по высоте таким образом, чтобы в пределах каждой части ширина паза могла быть выражена аналитически в зависимости от высоты, а плотность тока в каждой точке ее сечения была бы одинаковой. Например, для прямоугольного паза со свободной от обмотки верхней — клиновой частью (рис. 4-9) таких участков интегрирования будет три: нижняя часть паза, занятая изоляцией высотой h_0, часть паза с однослойной обмоткой высотой h_1 и клиновая часть с высотой h_2.

Коэффициент магнитной проводимости всего паза равен:

$$\lambda_п = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = \int_0^{h_0} \left(\frac{S_x}{S_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x} + \int_0^{h_1} \left(\frac{S_x}{S_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x} + \int_0^{h_2} \left(\frac{S_x}{S_п}\right)^2 \frac{dx}{b_x} = \frac{1}{3}\frac{h_1}{b} + \frac{h_2}{b}. \qquad (4\text{-}41)$$

В двухслойных обмотках с укороченным шагом в части пазов размещены стороны катушек, принадлежащих разным фазам, поэтому токи в них сдвинуты во времени.

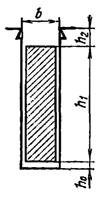


Рис. 4-9. К расчету $\lambda_п$ прямоугольного паза с однослойной обмоткой.

Влияние этого на потокосцепление пазового рассеяния в расчетных формулах учитывается коэффициентами k_β и k'_β, зависящими от укорочения шага обмотки.

Чтобы не производить интегрирование при каждом из расчетов для наиболее употребительных конфигураций пазов, оно выполнено заранее и приводится в виде справочных таблиц (см. гл. 6 и 7).

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния принципиально мог бы быть найден методом, аналогичным описанному выше, однако индуктивное сопротивление лобовых частей обмоток определяется не только индуктивностью каждой из катушек, но и взаимоиндуктивными связями лобовых частей всех катушек обмотки. Это значительно усложняет расчет, так как поле рассеяния в зоне расположения лобовых частей имеет более сложный характер, чем в пазах. Криволинейность проводников в лобовых частях, разнообразные в различных машинах конфигурации поверхностей ферромагнитных деталей, окружающих лобовые части, и сложный характер индуктивных связей усложняют аналитический расчет $\lambda_л$ и требуют для его выполнения ряда упрощающих допущений. В практических расчетах коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки $\lambda_л$ определяют по относительно простым эмпирическим формулам, полученным на основании многочисленных экспериментальных исследований, проведенных для различных типов и конструкций обмоток. При вычислении значение $\lambda_л$ также относят к единице условной длины l'_δ.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния. Полем дифференциального рассеяния называют всю совокупность полей различных гармоник в воздушном зазоре, не участвующих в создании электромагнитного момента. Потокосцепление этих полей с витками обмотки определенным образом увеличивает ее индуктивное сопротивление, что учитывается коэффициентом магнитной проводи-

мости дифференциального рассеяния $\lambda_д$. Его значение зависит от размерных соотношений воздушного зазора, число пазов на полюс и фазу q, размеров шлица, зубцовых делений, степени демпфирования полей высших гармоник токами в проводниках, расположенных на противоположной от рассматриваемой обмотки стороне воздушного зазора, и от ряда других факторов.

Индуктивное сопротивление обмотки, обусловленное потоками рассеяния, определяется по (4-38), в которую вместо $\lambda_п$ подставляют сумму коэффициентов магнитной проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния:

$$x_\sigma = 4\pi f \mu_0 \frac{W^2}{pq} l'_\delta \Sigma\lambda =$$

$$= 15{,}8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} \Sigma\lambda, \quad (4\text{-}42)$$

где $\Sigma\lambda = \lambda_п + \lambda_л + \lambda_д$.

В асинхронных машинах индуктивное сопротивление фазы обмотки статора обозначают x_1, а обмотки ротора x_2. В синхронных машинах индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обозначают $x_{\sigma 1}$. В машинах постоянного тока индуктивное сопротивление обмотки якоря непосредственно не рассчитывается, однако коэффициенты магнитной проводимости рассеяния определяются для расчета реактивной ЭДС секций обмотки.

Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния непосредственно связаны с формой и размерами пазов, типом и конструкцией обмоток и размерными соотношениями зубцовой зоны. Эти факторы для различных типов машин различны. Расчет коэффициентов магнитных проводимостей рассеяния асинхронных и синхронных машин, а также машин постоянного тока приводится в соответствующих главах.

Индуктивности и активные сопротивления являются коэффициентами в уравнениях напряжений. Эти параметры входят как в дифференциальные уравнения, описывающие переходные и установившиеся режимы, так и в комплексные уравнения, описывающие только установившиеся процессы.

Момент инерции характеризует динамические свойства машины. Он входит в уравнение движения

$$J \frac{d\omega_p}{dt} \pm M_c = M_э, \quad (4\text{-}43)$$

где J — момент инерции;
$\omega_р$ — угловая скорость ротора;
M_c — момент сопротивления;
$M_э$ — электромагнитный момент.

Момент инерции вращающегося тела равен сумме произведений масс всех его точек на квадраты их расстояний от оси вращения. Значение момента инерции тела относительно оси OZ может быть получено из интеграла

$$J_z = \int_V \rho^2 dV,$$

где ρ — расстояние до оси вращения OZ;
dV — элемент объема.

Для тел, имеющих простую геометрическую форму (цилиндр, диск и т. п.), значения моментов инерции приводятся в справочниках. Например, момент инерции полого цилиндра массой m, длиной l, внешним радиусом R_1 и внутренним R_2 равен:

$$J = \frac{m}{12}\left(3R_1^2 + 3R_2^2 + l^2\right).$$

Момент инерции сплошного цилиндра ($R_2=0$; $R_1=R$)

$$J = \frac{m}{12}(3R^2 + l^2).$$

Как видно, при одном и том же объеме момент инерции тела с меньшим радиусом будет меньше, чем при большом радиусе.

Момент инерции является мерой инертности тела, поэтому двигатели с малым моментом инерции разгоняются с большими ускорениями и быстро достигают установившейся частоты вращения. Для эксплуатации в режимах с частыми пусками стремятся выполнить двигатели с

малыми моментами инерции, для чего уменьшают диаметры роторов при соответствующем увеличении длин их сердечников.

В приводах с ударной или пульсирующей нагрузкой (поршневые компрессоры) целесообразно применять двигатели, имеющие большой момент инерции, т. е. с относительно большим диаметром ротора и малой длиной. При постоянной частоте вращения кинетическая энергия вращающегося тела пропорциональна его моменту инерции, поэтому двигатели с большим моментом инерции имеют большую кинетическую энергию, за счет которой преодолеваются толчки нагрузки.

Ввиду сложности конфигурации роторов электрических машин и наличия в них элементов с различной удельной массой (сталь сердечников, обмотка, изоляция, детали крепления) для расчета момента инерции ротор подразделяют на несколько частей, имеющих сравнительно простую конфигурацию, и для каждой из них определяют J, руководствуясь формулами специальных методик.

При расчете динамических характеристик двигателя вместе с приводом учитываются моменты инерции механизмов, соединенных с валом двигателя, значения которых приводятся к частоте вращения ротора. Общий приведенный момент инерции определяется по формуле

$$J_{пр} = J_1 + \Sigma \frac{J_{(i+1)}}{j_i^2},$$

где J_1 — момент инерции ротора двигателя;

$J_{(i+1)}$ — моменты инерции механизмов, соединенных с валом ротора;

j_i — передаточное отношение i-й передачи, равное отношению частот вращения данного механизма и ротора двигателя.

4-3. ПОТЕРИ И КПД

При работе электрической машины часть подводимой мощности расходуется на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, создание необходимого для охлаждения потока воздуха, трение вращающихся частей о воздух, трение в подшипниках и т. д. Эту часть мощности называют потерями, так как она как бы «теряется» при электромеханическом преобразовании энергии.

Потери в электрических машинах подразделяют на основные и добавочные.

К основным потерям относят электрические потери, включающие потери в обмотках при прохождении по ним тока и потери в скользящих контактах (щетки — контактные кольца или щетки — коллектор), потери в стали, возникающие при перемагничивании стальных сердечников, вентиляционные и механические потери.

Электрические потери в обмотках, Вт,

$$P_э = mI^2 r_\vartheta,$$

где m — число фаз (в машинах постоянного тока $m=1$);

I — ток в обмотке, А;

r_ϑ — сопротивление обмотки, приведенное к расчетной температуре, Ом.

Электрические потери в скользящих контактах $P_{э,щ}$ не могут быть рассчитаны точно, так как их сопротивления не постоянны и зависят от режима работы, состояния трущихся поверхностей, удельного давления щеток и других факторов. В расчетах $P_{э,щ}$ находят по задаваемому в технической характеристике щеток уровню падения напряжения в скользящем контакте $\Delta U_щ$, В, и току через контакт

$$P_{эщ} = 2\Delta U_щ I,$$

причем $\Delta U_щ$ принимают постоянным во всех режимах работы машины.

Основные потери в стали магнитопровода $P_{ст,осн}$ состоят из потерь на гистерезис $P_г$ и потерь на вихревые токи $P_{в,т}$, которые по-разному зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, частоты перемагничивания, индукции. На них оказывают также влияние раз-

личные технологические факторы, связанные со штамповкой и опиловкой пазов («наклеп», образование заусенцев и т. п.). Точный расчет $P_г$ и $P_{в,т}$ практически невозможен. При расчете машин для определения основных потерь в стали пользуются приближенной формулой, основанной на результатах многочисленных теоретических и экспериментальных исследований:

$$P_{ст.осн} = k_{дi}\, p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_i^2 m_i, \quad (4\text{-}44)$$

где $k_{дi}$ — коэффициент, учитывающий увеличение потерь, вызванное наклепом при штамповке, неравномерностью распределения индукции и т. д.;

$p_{1,0/50}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг;

f — частота перемагничивания, Гц;

B_i — индукция в соответствующей части машины, Тл;

m_i — масса соответствующей части машины, кг;

β — показатель степени, зависящий от марки стали.

Данные по выбору $p_{1,0/50}$, $k_д$ и β для конкретных типов машин представлены в соответствующих главах книги.

К вентиляционным и механическим потерям относят потери на трение вращающихся частей машины о воздух, потери в вентиляторе на создание потока охлаждающего воздуха, потери на трение в подшипниках и потери на трение в скользящем контакте.

Расчетные формулы, позволяющие найти каждую из составляющих этих видов потерь, основаны на экспериментальных данных и отражают их зависимость от конструкции машины, частоты вращения и ряда других факторов. При расчете машин, конструкция которых не существенно отличается от базовых моделей, в расчете можно использовать эмпирические формулы, дающие непосредственно сумму вентиляционных и механических потерь (за исключением потерь на трение в скользящем контакте). Так как эти формулы получены для конкретных типов и видов конструктивного исполнения машин, то они приводятся в последующих главах книги. Там же приведены формулы для расчета потерь на трение в скользящих контактах.

Некоторые виды добавочных потерь имеют место при холостом ходе и не меняются при нагрузке машины, другие проявляются только с увеличением тока нагрузки. В зависимости от этого первый вид называют добавочными потерями холостого хода, а второй — добавочными потерями при нагрузке.

К добавочным потерям холостого хода относят поверхностные и пульсационные потери.

Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре. При работе машины индукция в каждой отдельно взятой точке, расположенной на одной из поверхностей магнитопровода, обращенной к зазору, будет изменяться от наибольшего значения (когда против нее на противоположной стороне зазора находится коронка зубца) до наименьшего (когда на другой стороне располагается паз). Частота таких пульсаций индукции определится числом зубцов и частотой вращения $f_z = nz/60$. Вызванная этими пульсациями ЭДС создаст в тонком поверхностном слое головок зубцов и полюсных наконечников вихревые токи, потери от которых и называют поверхностными.

Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и наоборот. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах асинхронных машин и на поверхности полюсных наконечников синхронных машин и машин постоянного тока. Для расчета $P_{пов}$ предварительно находят амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре B_0 в зависимости

от индукции в воздушном зазоре B_δ и размерных соотношений зазора. Среднее значение удельных поверхностных потерь, т. е. потерь, отнесенных к единице площади поверхности магнитопровода статора или ротора, обращенной к воздушному зазору, Вт/м²,

$$\left.\begin{aligned} P'_{пов1} &= k_0\left(\frac{Z_2 n}{10\,000}\right)^{1,5}(10^3 B_0 t_2)^2; \\ P'_{пов2} &= k_0\left(\frac{Z_1 n}{10\,000}\right)^{1,5}(10^3 B_0 t_1)^2, \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}45)$$

где k_0 определяет влияние на потери толщины листов стали магнитопровода, марки стали и способа обработки поверхностей;

Z_1 и Z_2 — числа зубцов статора и ротора;

n — частота вращения, об/мин;

B_0 — амплитуда пульсаций в воздушном зазоре, Тл;

t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора, м.

Полные потери получают умножением $P'_{пов}$ на всю рассматриваемую поверхность.

Пульсационные потери возникают в машинах, имеющих зубцы и на роторе, и на статоре, например в асинхронных машинах. Они обусловлены пульсациями потока в зубцах, что приводит к появлению вихревых токов в стали зубцов. Частота пульсаций потока и индукции в зубцах статора происходит с зубцовой частотой ротора, а частота пульсаций в зубцах ротора — с зубцовой частотой статора. Амплитуда пульсаций $B_{пул}$ зависит от среднего значения индукции в зубцах и размерных соотношений зубцовых зон, и ее определяют раздельно для зубцов статора и ротора по следующей приближенной формуле, Вт:

$$\left.\begin{aligned} P_{пул1} &= (0{,}09 \div 0{,}11)\times \\ &\times\left(\frac{Z_2 n}{1000}\right)^2 B^2_{пул} m_{z1}; \\ P_{пул2} &= (0{,}09 \div 0{,}11)\times \\ &\times\left(\frac{Z_1 n}{1000}\right)^2 B^2_{пул} m_{z2}, \end{aligned}\right\} \quad (4\text{-}46)$$

где Z_1 и Z_2 — числа зубцов статора и ротора;

$B_{пул}$ — амплитуда пульсаций индукции в зубцах ротора (статора), Тл;

m_{z1} и m_{z2} — массы зубцов статора и ротора, кг.

Добавочные потери при нагрузке возникают как в проводниках обмоток, так и в стали на отдельных участках магнитопровода. Ток нагрузки создает потоки рассеяния, сцепленные с проводниками обмоток. В результате этого в проводниках наводятся вихревые токи, вызывающие добавочные, не учтенные ранее в расчете потери. В машинах постоянного тока увеличение потерь при нагрузке связано также с коммутационным процессом, при котором токи в секциях меняют свое направление. Поля, созданные высшими гармониками МДС обмоток, и зубцовые гармоники поля с ростом нагрузки машины увеличивают поверхностные и пульсационные потери. В машинах постоянного тока увеличение добавочных потерь в стали с ростом нагрузки связано также с искажением магнитного поля под действием поперечной реакции якоря.

Расчет отдельных добавочных потерь при нагрузке производится обычно лишь для машин большой мощности. Для машин общепромышленного назначения эти потери учитываются приближенно. Согласно ГОСТ 11828-75 добавочные потери при нагрузке для асинхронных и синхронных машин и машин постоянного тока с компенсационной обмоткой при расчете берут равными 0,5% номинальной мощности, а для машин постоянного тока без компенсационной обмотки 1%.

При нагрузках, отличных от номинальной, добавочные потери должны быть пересчитаны пропорционально квадрату тока.

Коэффициент полезного действия η, %, при расчете электрических машин определяют по следующим формулам:

для генераторов

$$\eta = 100\left(1 - \frac{\Sigma P}{P_2 + \Sigma P}\right); \quad (4\text{-}47)$$

для двигателей

$$\eta = 100\left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right). \qquad (4\text{-}48)$$

В этих формулах P_2 — полезная мощность, отдаваемая генератором в сеть;

P_1 — мощность, подводимая к двигателю;

ΣP — сумма потерь в машине.

Коэффициент полезного действия машины не постоянен, а меняется в зависимости от нагрузки. Он достигает наибольшего значения при определенном уровне нагрузки и при ее дальнейшем увеличении начинает уменьшаться. Положение максимума кривой КПД зависит от соотношения потерь в машине. Максимум КПД машины имеет место при равенстве переменных потерь, зависящих от квадрата тока (электрические потери), и постоянных потерь, не зависящих от нагрузки (потери в стали, механические, вентиляционные).

При расчете машин стремятся получить такое соотношение этих видов потерь, чтобы КПД достигал максимума при нагрузке, несколько меньшей номинальной, так как большинство электрических машин, особенно двигателей, эксплуатируются с некоторой недогрузкой.

Глава пятая

ТЕПЛОВОЙ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

5-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромеханическое преобразование энергии в электрических машинах сопровождается преобразованием электрической или механической энергии в тепло. Тепло, выделяемое при работе машины, нагревает отдельные части электрической машины, повышая их температуру. Чрезмерное повышение температуры может вызвать в электрических машинах снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток. Допустимая предельная температура определяется классом нагревостойкости изоляции обмоток.

Температура частей электрической машины зависит от температуры охлаждающей (окружающей) среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды вводят понятие превышения температуры частей электрической машины над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ох}, \qquad (5\text{-}1)$$

где ϑ — температура рассматриваемой части электрической машины;

$\vartheta_{ох}$ — температура охлаждающей среды.

Номинальные данные электрической машины (мощность, напряжение, ток, частота вращения, коэффициент мощности, КПД и другие величины), указываемые на табличке, относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре газообразной окружающей среды до +40° С и охлаждающей воды +30° С, но не выше 33° С, если в стандартах или технических условиях на рассматриваемую машину нет других указаний.

Предельные допускаемые превышения температуры частей электрических машин, приведенные в табл. 5-1, установлены ГОСТ 183-74.

На нагревание электрической машины влияет режим ее работы, т. е. характер изменения нагрузки машины во времени.

При изменении температуры методом термометра согласно ГОСТ 11828-75 температура определяется термометром, прикладываемым к доступным поверхностям.

Измерение температуры обмоток методом сопротивления применяют для определения температуры обмотки по возрастанию ее сопротивления. Превышение температуры, °С, обмотки, изготовленной из меди, над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta = \frac{r_\vartheta - r_x}{r_x}(235 + \vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_{ох},$$

где r_ϑ — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом;
$r_х$ — сопротивление обмотки в холодном состоянии, Ом;
$\vartheta_х$ — температура обмотки в холодном состоянии, °С;
$\vartheta_{ох}$ — температура охлаждающей среды, °С.

При изготовлении обмотки из алюминия вместо 235 в формулу подставляют 245.

Измерение температуры методом температурных индикаторов предусматривает наличие термопар, заложенных в машину при ее изготовлении.

Согласно ГОСТ 183-74 на общие технические требования к электрическим машинам установлены восемь номинальных режимов работы, из которых наиболее часто встречаются следующие: 1) продолжительный (условное обозначение S1); 2) кратковременный (S2) с длительностями рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин; 3) повторно-кратковременный (S3) с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25, 40 и 60% длительности одного цикла работы, равного 10 мин, и 4) перемещающийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и холостого хода (S6) (без выключения машины) с продолжительностью нагрузки ПН=15, 25, 40 и 60% длительности одного цикла работы, равного 10 мин.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части электрической машины определяется суммой значения температуры, взятой из табл. 5-1, и температурой +40° С — предельной допускаемой температурой охлаждающей среды, принятой при составлении табл. 5-1.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений: для подшипников скольжения 80° С (температура масла не должна быть при этом выше 65° С); для подшипников качения 100° С.

Необходимость повышения использования активных материалов в связи с ростом единичной мощности машины первоначально обусловила применение в качестве охлаждающей среды водорода вместо воздуха, а в дальнейшем — переход к системе непосредственного охлаждения проводников обмотки, при которой имеет место непосредственное соприкосновение меди проводников с охлаждающим агентом.

При непосредственном охлаждении применяют в качестве охлаждающей среды не только газ, но и жидкость — воду или масло (жидкостное охлаждение). В специальных машинах применяется испарительное охлаждение.

В тепловом расчете электрической машины ставится задача определить превышение температуры различных частей машины над температурой охлаждающей среды. За допустимые превышения температуры обмоток электрических машин при расчете принимаются те, которые приведены в табл. 5-1 для случая определения их по методу сопротивления. В соответствии с режимами работы машин различают: а) расчет установившегося теплового режима, имеющего место при продолжительной работе машины, когда дальнейшего повышения температуры уже не происходит; б) расчет неустановившихся тепловых режимов, соответствующих кратковременным режимам работы машин.

В электрических машинах общепромышленного применения, предназначенных обычно для продолжительной работы, производят расчет установившегося теплового режима.

Однако для ряда электрических машин, работающих в различных регулируемых электроприводах, требуется рассчитать неустановившиеся тепловые процессы. Осуществление таких расчетов встречает большие трудности, и для их выполнения обычно приходится принимать электрическую машину или ее отдельные исследуемые части за однородное тело.

5-2. ВОПРОСЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Передача тепла в охлаждающую среду происходит благодаря теплопроводности частей машины и теплорассеянию с охлаждаемых поверхностей. Для подавляющего большинства электрических машин в ка-

Таблица 5-1

Предельные допускаемые превышения температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды +40° С и высоте над уровнем моря не более 1000 м (по ГОСТ 183-74)

Части электрических машин	Изоляционный материал классов (по ГОСТ 8865-70)														
	A			E			B			F			H		
	Предельные допускаемые превышения температуры, °С, при измерении														
	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в пазу	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в пазу
1. Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	60	60	—	70	70	—	80	80	—	100	100	—	125	125
2. Обмотки: а) обмотки переменного тока машин мощностью менее 5000 кВ·А с длиной сердечника менее 1 м б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3, 4 и 5 настоящей таблицы в) якорные обмотки, соединенные с коллектором	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—

3. Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	110	—	—	135	—
4. Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
5. Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев, и компенсационные обмотки	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	110	—	125	125	—
6. Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
7. Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя; 8. Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов самих элементов и соседних частей														
9. Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	60	75	—	75	80	—	80	100	—	100	125	—	125
10. Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

Примечания: 1. Для стержневых обмоток ротора асинхронных машин допускается по согласованию с заказчиком иметь превышения температуры по п. 4.
2. Превышения температуры, указанные в п. 9, не должны превосходить допускаемые значения для соприкасающихся обмоток.

честве охлаждающей среды используется воздух, который и будет рассматриваться ниже, в анализе процессов теплопередачи.

Теплоотдача на границе нагретой поверхности и охлаждающего воздуха определяется опытным законом Ньютона — Рихмана, согласно которому рассеиваемый поверхностью S тепловой поток, Вт,

$$Q = \alpha(\vartheta - \vartheta_{ох})S = \alpha\Delta\vartheta S. \quad (5\text{-}2)$$

Соответственно перепад температуры, °С, между поверхностью и воздухом составит:

$$\Delta\vartheta = \frac{Q}{\alpha S} = \frac{q}{\alpha}, \quad (5\text{-}3)$$

где $q=Q/S$ — плотность теплового потока на охлаждаемой поверхности, Вт/м²;

α — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м²·°С).

На пути движения потока Q возникают перепады температуры в изоляции обмоток, магнитопроводах статоров (роторов), при переходе тепла с поверхностей к охлаждающему воздуху и др.

Согласно основному закону теплопроводности плотность теплового потока в направлении его движения прямо пропорциональна температурному градиенту в этом же направлении:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} \Delta\vartheta.$$

Коэффициент λ называется коэффициентом теплопроводности. Знак минус поставлен потому, что при положительном направлении теплового потока температурный градиент является отрицательным, т. е. в этом направлении температура понижается.

При одномерном течении тепла, например в направлении оси x, имеем:

$$\operatorname{grad} \Delta\vartheta = \frac{d(\Delta\vartheta)}{dx}.$$

В табл. 5-2 приведены коэффициенты теплопроводности различных материалов.

Электрическая машина является сложным сочетанием разнородных тел, обладающих неодинаковыми физическими свойствами. Поэтому

Таблица 5-2

Значения коэффициентов теплопроводности материалов

Название материала	Вт/(°С·м)
Медь	380
Алюминий	220
Серебро	420
Сталь листовая электротехническая вдоль слоя:	
слаболегированная	(48—35)
среднелегированная	(30—26)
сильнолегированная	(20—19)
Сталь листовая электротехническая:	
поперек слоя	(1,2—0,87)
с бумажной изоляцией легированная	(4,4—3,1)
Лакоткань	0,15
Летероид	0,23
Электроизоляционный картон:	
сухой	0,180
пропитанный в масле	0,250
Миканит	0,20
Асбест	0,19
Эмаль, фарфор	(1,50—1,63)
Стекло	1,1
Дерево поперек волокон	0,11
Гетинакс	(0,226—0,276)
Воздух при 760 мм рт. ст., 40 °С	0,0266
Водород при 40 °С	0,190
Вода при 40 °С	0,633
Трансформаторное масло при 40 °С	0,164
Изоляция пазовая обмоток якоря машин постоянного тока и ротора асинхронных машин:	
классов A, E	0,10
классов B, F, H	0,16
то же статорных обмоток асинхронных машин:	
классов A, E, B (некомпаундированная)	0,10
классов B (компаундированная), F, H	0,16

определение картины теплового поля при установившемся режиме и наличии внутренних источников тепла потребовало бы решения системы дифференциальных уравнений Пуассона, имеющих для каждого тела в отдельности следующий вид:

$$\lambda_x \frac{d^2(\Delta\vartheta)}{dx^2} + \lambda_y \frac{d^2(\Delta\vartheta)}{dy^2} + \lambda_z \frac{d^2(\Delta\vartheta)}{dz^2} + p = 0, \quad (5\text{-}4)$$

где $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ — удельные теплопроводности по осям в рассматриваемом элементарном объеме тела;

p — удельные потери, выделяемые в том же объеме.

5-3. НАГРЕВАНИЕ ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

Анализ нагревания однородного тела может быть использован как для установившихся, так и для неустановившихся тепловых процессов.

В общем случае передача тепла идет тремя путями: теплопроводностью, конвекцией и излучением. С достаточной точностью можно считать, что тепло, рассеиваемое с поверхности тела S, пропорционально превышению температуры поверхности (5-2). При неизменных потерях Q, выделяемых в теле, дифференциальное уравнение нагревания, выражающее баланс энергии за время dt, будет иметь вид:

$$Q\,dt = cm\,d(\Delta\vartheta) + \alpha S \Delta\vartheta\,dt, \quad (5\text{-}5)$$

где c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);

m — масса тела, кг.

В установившемся режиме, когда достигнуто конечное превышение температуры тела, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду:

$$Q\,dt = \alpha S \Delta\vartheta_\infty\,dt,$$

или

$$Q = \alpha S \Delta\vartheta_\infty. \quad (5\text{-}6)$$

Общим решением уравнения (5-4) является

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_\infty - \Delta\vartheta_0)(1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (5\text{-}7)$$

где $\Delta\vartheta_0$ — начальное превышение температуры тела;

τ_1 — постоянная времени нагревания однородного тела:

$$\tau_1 = cm/\alpha S.$$

При $\Delta\vartheta_\infty > \Delta\vartheta_0$ уравнение (5-7) отображает процесс нагревания, при $\Delta\vartheta_\infty < \Delta\vartheta_0$ — процесс охлаждения. Кривые нагревания и охлаждения представлены на рис. 5-1. Если в процессе нагревания $\Delta\vartheta_0 = 0$, то уравнение (5-7) принимает вид:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_\infty (1 - e^{-t/\tau_1}). \quad (5\text{-}8)$$

Если при охлаждении конечная температура тела сравняется с температурой окружающей среды, то $\Delta\vartheta_\infty = 0$ и уравнение охлаждения по (5-7) примет вид:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 e^{-t/\tau_1}. \quad (5\text{-}9)$$

Теоретически конечное превышение температуры $\Delta\vartheta_\infty$ достигается через бесконечно большое время.

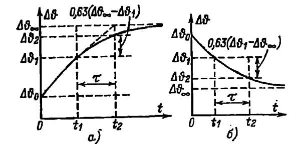


Рис. 5-1. Кривые нагревания (*а*) и охлаждения (*б*) однородного тела.

Однако практически можно считать температуру установившейся (в пределах точности до 5%) через время $t = (3 \div 4)\,\tau_1$. Согласно (5-6) ее значение составит:

$$\Delta\vartheta_\infty = Q/\alpha S. \quad (5\text{-}10)$$

Уравнение (5-7) позволяет рассчитать нагрев тела при любом неустановившемся тепловом режиме. Как видно из уравнения, для этого требуется знать установившееся превышение температуры $\Delta\vartheta_\infty$, соответствующее продолжительному режиму работы, и постоянную времени нагревания τ_1.

5-4. РАСЧЕТ УСТАНОВИВШЕГОСЯ НАГРЕВА

Основными источниками выделения тепла в электрической машине являются обмотки, стальные части магнитной цепи и конструктивных элементов, в которых возникают потери от перемагничивания. Необходим также учет нагрева скользящего контакта. Механические потери, включая вентиляционные, обычно имеют меньшее значение.

На пути движения тепловых потоков от источника тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, толще изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете определяются эти внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей электрической машины над температурой охлаждающего воздуха. При непосредственном соприкосновении материала обмоток с охлаждающей средой, т. е. при непосредственном охлаждении проводников обмотки, определяется превышение температуры металла обмотки над температурой охлаждающего газа или жидкости.

Перепадом температуры в толще металла обмотки и магнитопровода часто пренебрегают, так как теплопроводность металлов в сотни раз больше теплопроводности изоляции (табл. 5-2).

В практических расчетах ограничиваются определением среднего превышения температуры обмоток, т. е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) в рассматриваемых объемах постоянна.

Для определения полного перегрева обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая в машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Рассмотрим расчет составляющих превышения температуры.

Температурный перепад в толщине изоляции $\Delta\vartheta_{из}$. Количество теплоты Q, проходящей через изоляцию за 1 с (тепловой поток), пропорционально перепаду температуры $\Delta\vartheta_{из}$ по толщине изоляции, площади S изоляции в плоскости, перпендикулярной движению теплового потока, и коэффициенту теплопроводности $\lambda_{из}$ изоляционного материала и обратно пропорционально толщине изоляционного слоя $b_{из}$:

$$Q = \Delta\vartheta_{из} \frac{\lambda_{из} S_{из}}{b_{из}}. \quad (5\text{-}11)$$

Соответственно перепад установившейся температуры составит:

$$\Delta\vartheta_{из} = Q \frac{b_{из}}{\lambda_{из} S_{из}}. \quad (5\text{-}12)$$

Введем понятие теплового сопротивления изоляционного слоя, определяющего перепад температуры аналогично электрическому сопротивлению и вызывающего соответствующее падение напряжения в цепи:

$$R_{из} = \frac{b_{из}}{\lambda_{из} S_{из}}. \quad (5\text{-}13)$$

В многослойной изоляции суммарный перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Соответственно суммарное тепловое сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных слоев изоляции:

$$R_{из} = R_{из1} + R_{из2} + \ldots + R_{изn},$$

где $R_{изn} = b_{изn}/\lambda_{изn} S_{изn}$ — тепловое сопротивление n-го слоя.

Так как $S_{из1} = S_{из2} = \ldots = S_{изn}$, то

$$b_{из}/\lambda_{экв} = b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \ldots + \frac{b_{изn}}{\lambda_{изn}}, \quad (5\text{-}14)$$

где $b_{из1}, b_{из2}\ldots$ — толщины отдельных слоев изоляции; $\lambda_{из1}, \lambda_{из2}\ldots$ — коэффициенты теплопроводности изоляции соответствующих слоев.

Из (5-14) определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности многослойной изоляции с общей толщиной $b_{из}$:

$$\lambda_{экв} = \frac{b_{из}}{b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \ldots + b_{изn}/\lambda_{изn}} \quad (5\text{-}15)$$

Теплопроводность тонких слоев воздуха крайне низка. Поэтому наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции может резко снизить результирующую теплопроводность такой изоляции. Путем компаундировки в специальных вакуум-аппаратах стремятся вытеснить воздух из изоляции, в результате чего значительно улучшаются теплопроводность и электрическая прочность изоляции.

В практических тепловых расчетах для слоистой изоляции различной нагревостойкости принимают на основании опытных данных значения

результирующих коэффициентов теплопроводности, указанные в табл. 5-2.

Теплопередача с поверхности. Отвод тепла с поверхности нагретого тела происходит путем излучения в окружающее пространство (лучеиспусканием), передачи тепла путем теплопроводности, передачи его путем конвекции.

В чистом виде теплопередача путем излучения может иметь место, если нагретая поверхность находится в вакууме. Теплопередача путем теплопроводности воздуха (или другого газа) настолько мала (табл. 5-2), что ее практически невозможно учесть.

Конвективная теплопередача обусловлена нагревом воздуха, соприкасающегося с нагретой поверхностью электрической машины и вследствие этого совершающего восходящее движение. Его место занимает более холодный воздух, который, в свою очередь, нагревается и движется вверх. Конвективную теплопередачу сильно повышает принудительное увеличение скорости движения воздуха (искусственный обдув нагретой поверхности). В практических расчетах нагрева электрических машин обычно применяют упрощенные формулы, определяющие перепад температуры между нагретой поверхностью и охлаждающим газом, которые учитывают все виды теплоотдачи с поверхности, имеющие место при охлаждении электрических машин. Перепад температуры, °С, на поверхности определится в этом случае выражением

$$\Delta\vartheta_{\text{пов}} = \frac{Q_{\text{пов}}}{S_{\text{пов}}\alpha_{\text{пов}}}, \qquad (5\text{-}16)$$

где $Q_{\text{пов}}$ — тепловой поток через поверхность, Вт;

$S_{\text{пов}}$ — площадь поверхности охлаждения, м^2;

$\alpha_{\text{пов}}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности, зависящий от материала и состояния поверхности, скорости и характера потока воздуха, омывающего охлаждающую поверхность, и ряда других факторов.

Выражение (5-16) можно представить также в виде

$$\Delta\vartheta_{\text{пов}} = Q_{\text{пов}}R_{\text{пов}}, \qquad (5\text{-}17)$$

где тепловое сопротивление на поверхности нагретого тела

$$R_{\text{пов}} = 1/S_{\text{пов}}\alpha_{\text{пов}}. \qquad (5\text{-}18)$$

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{\text{пов}}$ определяются экспериментально на моделях и с целью использования их для конкретных случаев расчета теплоотдачи поверхности выражаются с помощью безразмерных чисел подобия. Наиболее часто в тепловых расчетах электрических машин применяются нижеприведенные.

1. Число Нуссельта

$$\text{Nu} = \alpha d/\lambda. \qquad (5\text{-}19)$$

Число Нуссельта связывает коэффициент теплотдачи α нагретой стенки канала с коэффициентом теплопроводности λ охлаждающей среды, движущейся относительно этой стенки. Величина d в (5-19) является определяющим размером, характеризующим геометрию исследуемой поверхности.

Для поверхностей каналов с поперечным сечением произвольной формы определяющий размер принимают равным гидравлическому диаметру этого сечения:

$$d = 4S/\Pi, \qquad (5\text{-}20)$$

где S и Π — соответственно площадь и периметр поперечного сечения канала.

Для канала круглого сечения d является диаметром сечения.

При прямоугольном сечении со сторонами b и h гидравлический диаметр равен:

$$d = \frac{2bh}{b+h}; \qquad (5\text{-}21)$$

для квадратного сечения ($b=h$)

$$d = b; \qquad (5\text{-}22)$$

при узких прямоугольных каналах ($h \gg b$)

$$d \approx 2b. \qquad (5\text{-}23)$$

Для охлаждаемых открытых поверхностей определяющий размер d принимается равным длине или высоте охлаждаемой поверхности.

Таблица 5-3

Физические параметры сухого воздуха (при $p=0{,}1$ МПа)

Параметр	Температура, °C							
	0	10	20	30	40	50	60	70
λ, Вт/(°C·м)	0,0238	0,0245	0,0252	0,0258	0,0266	0,0272	0,02795	0,0286
ρ, кг/м³	1,252	1,206	1,164	1,127	1,092	1,057	1,020	0,996
ν, 10^{-8} м²/с	1396	1482	1568	1660	1752	1847	1943	2045
c_p, Дж/(°C·кг)	1010	1010	1015	1015	1020	1020	1020	1020
a, 10^{-8} м²/с	1878	2010	2123	2260	2394	2535	2678	2827

2. Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = vd/\nu. \qquad (5\text{-}24)$$

Критерий Рейнольдса определяет характер движения охлаждающей среды, обладающей кинематической вязкостью ν и движущейся со скоростью v.

Кинематическая вязкость ν характеризует внутреннее трение частиц охлаждающей среды, т. е. свойство последней оказывать сопротивление взаимному сдвигу смежных слоев частиц. Величина ν имеет единицу м²/с.

3. Число Прандтля определяет свойства охлаждающей среды:

$$\mathrm{Pr} = \nu/a, \qquad (5\text{-}25)$$

где

$$a = \lambda/c_p\rho \qquad (5\text{-}26)$$

a — температуропроводность, м²/с;

c_p — удельная теплоемкость окружающей среды (жидкости, газа) при постоянном давлении, Дж/(°C·кг);

ρ — плотность окружающей среды, кг/м³.

Физические параметры наиболее часто применяемой в электромашиностроении охлаждающей среды — воздуха даны в табл. 5-3.

Для радиальных каналов статора при воздушном охлаждении и средней скорости воздуха в них $v_{ср} \gg 5$ м/с значения α приведены на рис. 5-2. Средняя скорость воздуха $v_{ср}$ приведена на рис. 5-3 в процентах окружной скорости ротора $v_{рот}$ в зависимости от отношения аксиальной длины ротора l к полюсному делению τ.

Для якоря и катушек возбуждения машин постоянного тока коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C), приближенно определяют по формуле

$$\alpha \approx 1{,}4\left(1 + 0{,}8\sqrt{v_a}\right), \qquad (5\text{-}27)$$

где v_a — окружная скорость якоря, м/с.

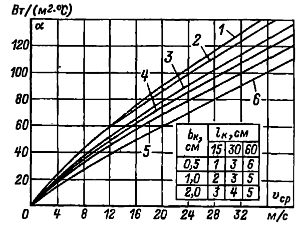


Рис. 5-2. Коэффициенты теплоотдачи радиальных каналов.

Кривые 1—6 — соответствуют различным значениям длины и ширины каналов.

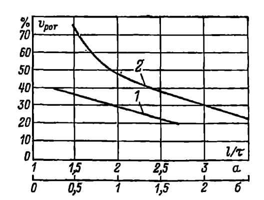


Рис. 5-3. Средняя скорость воздуха в процентах окружной скорости ротора.

1 — в вентиляционных каналах асинхронных машин; 2 — в вентиляционных каналах явнополюсных машин.

Коэффициент теплоотдачи внешней поверхности коллектора и контактных колец определяется по эмпирической формуле

$$\alpha_{кол} = 50\left(1 + k\sqrt{v_{кол}}\right), \quad (5\text{-}28)$$

где $v_{кол}$ — окружная скорость коллектора, м/с;

k — опытный коэффициент; для нормальных условий вентиляции $k=0{,}7$; при усиленном обдуве внешней поверхности и наличии вентиляционных каналов в коллекторной втулке $k=1\div1{,}3$.

Для различных нагретых поверхностей в электрических машинах, находящихся в спокойном воздухе, значения коэффициентов теплоотдачи приведены в табл. 5-4.

Таблица 5-4

Значения коэффициента α_0 для нагретых поверхностей в спокойном состоянии

Характеристика поверхности	α_0, Вт/(°С·м²)
Чугунная или стальная поверхность, отшпаклеванная и покрытая лаком (станины и подшипниковые щиты электрических машин)	14,2
Чугунная или стальная поверхность, неотшпаклеванная, по покрытая лаком	16,7
Лакированная медная поверхность	13,3

При обдуве нагретой поверхности со скоростью воздуха 5—25 м/с коэффициент теплоотдачи, взятый из табл. 5-4, следует соответственно увеличить:

$$\alpha = \alpha_0(1 + k_0 v_в), \quad (5\text{-}29)$$

где $v_в \approx V_в/S_к$ — скорость воздуха, м/с;

$V_в$ — количество воздуха, обдувающего нагретую поверхность, м³/с;

$S_к$ — поперечное сечение вентиляционного канала около нагретой поверхности, м²;

k_0 — коэффициент, учитывающий эффективность обдува.

Для внешней поверхности ротора электрической машины $k_0=0{,}1$; для поверхности лобовых частей статорных обмоток $k_0=0{,}07\div0{,}05$.

В закрытых машинах для улучшения охлаждения выполняют внешнюю поверхность корпуса статора ребристой. Ребра располагают вдоль предполагаемого направления движения потока охлаждающего воздуха.

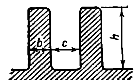


Рис. 5-4. Ребра наружной поверхности корпуса закрытой обдуваемой машины.

Тепловой поток, отводимый с оребренной поверхности корпуса, состоит из части, рассеиваемой с поверхности корпуса $S_{кор}$, соответствующей промежуткам c между ребрами (рис. 5-4), и части, рассеиваемой поверхностью ребер $S_{реб}$:

$$Q = (\alpha_{кор} S_{кор} + \alpha_{реб} S_{реб})\,\Delta\vartheta, \quad (5\text{-}30)$$

где $\alpha_{кор}$ — коэффициент теплоотдачи гладкого корпуса, Вт/(°С·м²);

$\alpha_{реб}$ — коэффициент теплоотдачи ребер, приведенный к поверхности цилиндрической части корпуса (рис. 5-2) и превышению температуры корпуса над температурой охлаждающего воздуха $\Delta\vartheta$.

Оребрение корпуса — эффективная мера, обеспечивающая улучшение охлаждения машины. Но теплоотдача растет не пропорционально числу ребер и их высоте. Теплоотдачу ухудшает взаимный подогрев ребер вследствие теплоизлучения и увеличения аэродинамического сопротивления.

Рекомендуется брать расстояние между ребрами $c=1{,}5\div2$ см при длине ребер от 0,2 до 1 м. В машинах большой мощности делаются толстые ребра с $b=3\div12$ мм.

При определении установившейся температуры рассматриваемой

части машины необходимо учесть подогрев воздуха, обдувающего поверхность.

Полный подогрев охлаждающего воздуха

$$\Delta\vartheta_в = Q_{пов}/c_в V_в, \qquad (5\text{-}31)$$

где $c_в = 1100$ Дж/(°С·м³) — удельная теплоемкость воздуха;

$V_в$ — необходимое количество охлаждающего воздуха, м³/с.

Принимая линейный характер изменения нагрева воздуха вдоль пути его движения, считают, что среднее превышение его температуры над температурой входящего холодного воздуха ϑ_x равно примерно $0{,}5\ \Delta\vartheta_в$.

В итоге средняя установившаяся температура обмотки электрической машины включает перепад температуры в изоляции $\Delta\vartheta_{из}$, превышение температуры охлаждаемой поверхности $\Delta\vartheta_{пов}$ и среднее превышение температуры воздуха:

$$\vartheta = \Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов} + 0{,}5\Delta\vartheta_в + \vartheta_x. \qquad (5\text{-}32)$$

5-5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ С ПОМОЩЬЮ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Метод тепловых схем замещения, использующих понятия тепловых сопротивлений и рассчитываемых по правилам для электрических цепей, получил при проектировании электрических машин широкое распространение. При этом параллельное сложение тепловых сопротивлений применяют для решения не только двухмерных, но и трехмерных задач, когда суммируются тепловые сопротивления по трем направлениям тепловых потоков.

Применение тепловых схем замещения дает возможность определять средние температуры частей электрической машины, принимаемых за однородные тела.

Для каждой части тепловой схемы справедливо основное уравнение, вытекающее из (5-16) или (5-12):

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = Q_{12} R_{12}, \qquad (5\text{-}33)$$

где Q_{12} — тепловой поток между точками 1 и 2 схемы, представляющими 1-ю и 2-ю части машины, Вт;

ϑ_1, ϑ_2 — средние температуры этих частей, °С;

R_{12} — тепловое сопротивление между точками 1 и 2 схемы, °С/Вт.

Рис. 5-5. Тепловая схема замещения статора машины переменного тока.

а — при различных температурах воздуха у теплорассеивающих поверхностей; *б* — при одинаковой температуре охлаждающего воздуха; *в* — упрощенная схема при $R_{пр}=0$.

Естественно, что чем большее число эквивалентных элементов может быть предложено для замены отдельных частей электрической машины, тем точнее окажется расчет. Однако усложнение тепловой схемы, а следовательно, и расчета должно сочетаться с достижимой точностью расчета при имеющейся неопределенности исходных данных.

На примере статора машины переменного тока рассмотрим построение тепловой схемы замещения. Разбиваем статор на три условно однородные в тепловом отношении тела, являющиеся источниками тепла: пазовая часть обмотки статора

с потерями $P_п$, две стороны лобовых частей с суммарными потерями $P_л$ и стальной сердечник статора с потерями $P_с$.

Каждая часть создает тепловые потоки. Считая в общем случае, что условия охлаждения рассматриваемых частей машины различны, принимаем четыре пути рассеяния тепла (рис. 5-5, *а*): $Q_{из}$ — тепловой поток к стенкам зубцов сердечника с перепадом температуры в тепловом сопротивлении пазовой изоляции $R_{из}$; $Q_к$ — тепловой поток к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах через тепловое сопротивление $R_к$; $Q'_{пр}$ и $Q''_{пр}$ — тепловые потоки от пазовой части обмотки с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_{пр}$ вдоль проводников обмотки. Лобовые части обмотки рассеивают со своих поверхностей тепловые потоки $Q'_л$ и $Q''_л$ с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_л$. Поверхности сердечника статора рассеивают тепловые потоки $Q'_с$ и $Q''_с$ с боковых сторон пакетов с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_с$ и поток $Q_{с.р}$ в радиальном направлении с наружной поверхности ярма статора и внутренней поверхности статора при общем тепловом сопротивлении $R_{с.р}$.

В случае одинаковой температуры охлаждающего воздуха у тепло-рассеивающих поверхностей тепловой расчет можно вести по схеме замещения на рис. 5-5, *б*. В этом случае тепловые сопротивления $R_{пр}$ и $R_л$ представляют собой параллельно соединенные сопротивления $R'_{пр}$ и соответственно $R'_л$:

$$R_{пр} = R'_{пр}/2; \quad R_л = R'_л/2, \quad (5\text{-}34)$$

а сопротивление $R_с$ — параллельно соединенные сопротивления $R'_с$ и $R_{с.р}$:

$$R_с = \frac{1}{1/R_{с.п} + 1/R_{с.р}}, \quad (5\text{-}35)$$

где $R_{с.п} = R'_с/2$.

В схеме на рис. 5-5, *б* имеется восемь неизвестных: $\vartheta_п$, $\vartheta_л$ и $\vartheta_с$ — средние температуры пазовой части обмотки, лобовых частей и сердечника статора; $Q_{из}$, $Q_{пр}$, $Q_к$, $Q_л$ и $Q_с$ — тепловые потоки, упомянутые выше. Для определения этих неизвестных составим в соответствии с рис. 5-5, *б* систему уравнений:

$$\left.\begin{aligned} &P_п + P_л + P_с = Q_л + Q_к + \\ &\qquad + Q_с; \\ &Q_л = P_л + Q_{пр}; \\ &Q_с = Q_{из} + P_с; \\ &\vartheta_п - \vartheta_x = Q_к R_к; \\ &\vartheta_л - \vartheta_x = Q_л R_л; \\ &\vartheta_с - \vartheta_x = Q_с R_с; \\ &\vartheta_п - \vartheta_л = Q_{пр} R_{пр}; \\ &\vartheta_п - \vartheta_с = Q_{из} R_{из}. \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}36)$$

В результате совместного решения этих уравнений находим средние температуры отдельных частей статора, равные превышениям температур, если $\vartheta_x = 0$.

Тепловые схемы на рис. 5-5 могут быть использованы и для синхронных явнополюсных машин защищенного исполнения.

Тепловые сопротивления этих схем рассчитываются по следующим формулам.

1. Тепловое сопротивление пазовой изоляции

$$R_{из} = b_{из}/\lambda_{из} S_{из}, \quad (5\text{-}37)$$

где $b_{из}$ — толщина пазовой изоляции, м;

$\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности изоляции по табл. 5-2;

$S_{из}$ — площадь изоляции, м^2:

$$S_{из} = Z\Pi l_{ст} = Z\Pi (n_к + 1)\, l_{ак}; \quad (5\text{-}38)$$

Z — число пазов статора;

$\Pi = 2(b_п + h_п - h_к)$ — периметр паза, м;

$b_п$ и $h_п$ — ширина и высота паза;

$h_к$ — высота клина;

$n_к$ — число радиальных вентиляционных каналов;

$l_{ак}$ — аксиальная длина магнитопровода.

2. Тепловое сопротивление лобовой части обмотки

$$R_л = \frac{b_{из}}{\lambda_{из} S_л} + \frac{1}{\alpha_л S_л}, \quad (5\text{-}39)$$

где $b_{из}$ — толщина изоляции катушки, м;

$\lambda_{из}$ — из табл. 5-2;

$\alpha_л = 10(1+0,54\,v^2)$;

v — скорость воздуха, м/с;

$S_л$ — площадь теплоотдачи лобовых частей (для однослойных обмоток $S_л = Z\Pi_{кт}l_л$; для двухслойных обмоток $S_л = 2Z\Pi_{кт}l_л$);

$\Pi_{кт}$ — периметр катушки;

$l_л$ — длина лобовой части.

3. **Тепловое сопротивление металла всех стержней обмотки по длине проводника**

$$R_{пр} = \frac{l_1 + l_л}{12 Z u_п q_{эф} \lambda} = R'_{пр}/2, \quad (5\text{-}40)$$

где $u_п$ — число эффективных проводников в пазу;

$q_{эф}$ — сечение эффективного проводника, м^2;

λ — коэффициент теплопроводности металла проводника (см. табл. 5-2).

4. **Тепловое сопротивление от обмотки к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах**

$$R_к = \frac{b_{из}}{\lambda_{из} S_к} + \frac{1}{\alpha_к S_к}, \quad (5\text{-}41)$$

где $b_{из}$ и $\lambda_{из}$ — толщина и коэффициент теплопроводности пазовой изоляции по табл. 5-2; $S_к$ — площадь теплопередачи поверхности обмотки в радиальных каналах, м^2:

$$S_к = Z\Pi b_к n_к; \quad (5\text{-}42)$$

$b_к$ — ширина радиального канала (обычно 10^{-2} м);

$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи по рис. 5-2 и 5-3.

5. **Тепловое сопротивление R_c от магнитопровода статора (ротора) охлаждающему воздуху.** Теплоотдача от магнитопровода происходит по различным путям в зависимости от системы вентиляции.

В продуваемых машинах с радиальной вентиляцией тепловой поток рассеивается преимущественно боковыми поверхностями. На своем пути он встречает одно тепловое сопротивление, обусловленное перепадом температур между поверхностью и охлаждающим воздухом, и другое — при движении потока поперек слоя листов электротехнической стали пакета к боковым его поверхностям.

Тепловое сопротивление R_{cq} в поперечном направлении пакетов к охлаждающему воздуху составит:

$$R_{cq} = \frac{1}{\alpha_к S_{пакq}} + \frac{l_{пак}}{6\lambda_{cq} S_{пакq}}, \quad (5\text{-}43)$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи в радиальных вентиляционных каналах (рис. 5-2);

$S_{пакq}$ — боковая теплорассеивающая поверхность всех пакетов, м^2:

$$S_{пакq} = \pi(D_a - h_j)h_j(n_к + 1); \quad (5\text{-}44)$$

D_a — наружный диаметр статора, м;

h_j — высота ярма статора, м;

$l_{пак}$ — длина пакета статора, м;

λ_{cq} — коэффициент теплопроводности электротехнической стали поперек листов (из табл. 5-2);

$n_к$ — число радиальных каналов.

Рассеивается тепло сердечника и с его цилиндрических поверхностей. Теплоотдача с внешней поверхности магнитопровода при радиальной вентиляции обычно невелика вследствие малой скорости движения воздуха около этой поверхности. Теплоотдача с внутренней его поверхности к ротору через воздушный зазор может быть достаточно большой при малом зазоре, что имеет место в асинхронных машинах. При большом воздушном зазоре, например в синхронных машинах и машинах постоянного тока, теплоотдача происходит в струю воздуха, проходящего через воздушный зазор.

В соответствии с указанными путями движения тепловых потоков (рис. 5-5, *а*) в машине с радиаль-

ной вентиляцией получаем:

$$R_{с.р} = \frac{1}{1/R_{нар} + 1/R_{вн}} = \frac{1}{\alpha_{нар} S_{нар} + \alpha_{вн} S_{вн}}, \quad (5\text{-}45)$$

где $\alpha_{нар}$ — коэффициент теплоотдачи внешней (наружной) поверхности пакетов магнитопровода при радиальной вентиляции (направление струй воздуха от центра к периферии статора): $\alpha_{нар} = 14 \div 20$ Вт/(°С·м²);

$S_{нар}$ — внешняя (наружная) поверхность пакетов сердечников, м²:

$$S_{нар} = \pi D_a l_{пак}(n_к + 1); \quad (5\text{-}46)$$

$l_{пак}$ — аксиальная длина одного пакета магнитопровода, м;

$\alpha_{вн}$ — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности пакетов сердечника, $\alpha_{вн} = \alpha'_\delta$.

Значение α'_δ зависит от воздушного зазора δ и шероховатости теплорассеивающих поверхностей, определяемой технологическим допуском e обработки. Значения e для поверхностей ротора и статора различны. В среднем $e = 0{,}08 \div 0{,}1$ мм; α'_δ находят по значению критерия Нуссельта:

$$\mathrm{Nu} = \frac{0{,}212 f \mathrm{Re}}{1 - 3{,}81 \sqrt{f \mathrm{Re}}}, \quad (5\text{-}47)$$

где f — коэффициент шероховатости поверхности:

$$f = \frac{1}{4[1{,}11 + 2\lg \delta/e]^2}; \quad (5\text{-}48)$$

Re — критерий Рейнольдса: $\mathrm{Re} = vS/\nu$;

δ — воздушный зазор, м;

v — окружная скорость ротора, м/с;

$\nu = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с — кинематическая вязкость воздуха (табл. 5-3).

Из значения критерия Нуссельта (5-47) по (5-19) определяют:

$$\alpha'\delta = [\mathrm{Nu}] \frac{\lambda}{2\delta}, \quad (5\text{-}49)$$

где $\lambda = 0{,}00026$ Вт/(°С·м) — коэффициент теплопроводности воздуха (см. табл. 5-2).

По значениям (5-43) и (5-45) определяется полное тепловое сопротивление $R_с$ при радиальной вентиляции:

$$R_с = \frac{1}{1/R_{сq} + 1/R_{с.р}}. \quad (5\text{-}50)$$

В машинах с аксиальной вентиляцией тепловой поток передается в общем случае тремя параллельными путями: через аксиальные вентиляционные каналы, расположенные внутри магнитопровода, и от наружной и внутренней цилиндрических поверхностей пакетов статора:

$$R_с = \frac{1}{1/R_к + 1/R_{нар} + 1/R_{вн}} = \frac{1}{\alpha_к S_к + \alpha_{нар} S_{нар} + \alpha_{вн} S_{вн}}, \quad (5\text{-}51)$$

где $\alpha_к$ берется по рис. 5-2;

$$S_к = n_к \pi d_к l_к, \quad (5\text{-}52)$$

где $n_к$ — число аксиальных каналов;

$d_к$, $l_к$ — диаметр и длина канала, м;

$\alpha_{вн}$ — для синхронных машин берется по рис. 5-2, для асинхронных — по (5-49);

$S_{нар}$ берется по (5-46);

$$S_{вн} = S_{нар} D/D_a; \quad (5\text{-}53)$$

D — внутренний диаметр статора.

Тепловая схема замещения, оценивающая взаимное тепловое влияние ротора и статора асинхронной машины, приведена на рис. 5-6. Обозначения на схеме приняты применительно к рис. 5-5. Индекс 1 относится к статору, индекс 2 — к ротору.

Тепловая связь статора и ротора представлена тепловым сопротивлением воздушного зазора:

$$R_\delta = \frac{1}{\alpha'_\delta S_\delta}, \quad (5\text{-}54)$$

где α'_δ берется по (5-49);

S_δ — теплопередающая поверхность воздушного зазора, м².

Тепловые сопротивления схемы на рис. 5-6 определяются по формулам для схемы на рис. 5-5; из сопротивлений R_{c1} и R_{c2} сопротивление R_δ исключено. Решение системы из 14 уравнений, определяемых схемой рис. 5-6, целесообразно выполнять с помощью ЭВМ, используя стандартные программы.

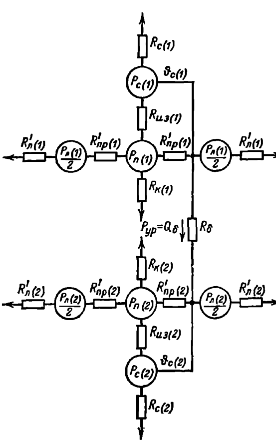


Рис. 5-6. Полная тепловая схема замещения асинхронной машины. Индекс 1 относится к статору, индекс 2 — к ротору.

При отсутствии такой возможности может быть использован итерационный метод расчета, согласно которому первоначально принимается $R_\delta = \infty$ и определяются превышения температур для статора и ротора раздельно. Если между температурами сердечников статора и ротора ϑ_{c1} и ϑ_{c2} оказывается большая разница, то находится уравнительный тепловой поток

$$P_{\text{ур}} = \frac{\vartheta_{c1} - \vartheta_{c2}}{R_\delta}$$

и соответственно понижается P_{c1} и повышается P_{c2} на $P_{\text{ур}}$. Затем производится второй расчет, в результате которого разность $\vartheta_{c1} - \vartheta_{c2}$ значительно уменьшается, и т. д.

Обычно достаточную точность дают один-два дополнительных расчета. Раздельные предварительные расчеты статора и ротора выполняются по сравнительно простым уравнениям, приведенным выше.

В закрытых машинах с внешним обдувом тепловой поток идет в основном к наружной цилиндрической поверхности обдуваемого корпуса. Поэтому удельный тепловой поток в этом направлении велик и перепад температур вдоль листов пакетов, которым обычно пренебрегают, необходимо учесть. Тепловое сопротивление ярма магнитопровода, соответствующее этому перепаду, составит:

$$R_{\text{пр}} = h_j/\lambda_c S_j, \qquad (5\text{-}55)$$

где h_j — высота ярма, м,
λ_c — коэффициент теплопроводности листовой электротехнической стали (вдоль слоя) из табл. 5-2;

$$S_j \approx S_{\text{пар}}.$$

Дополнительное сопротивление перемещению теплового потока к корпусу машины оказывает технологический зазор в месте посадки статора в корпус. Ввиду сложности физической картины перехода тепла в этом зазоре тепловое сопротивление, учитывающее последний, рекомендуется оценивать для закрытых машин опытным коэффициентом теплопередачи

$$\alpha_{\delta j} = 800 \div 1000 \text{ Вт/(°С·м)}. \qquad (5\text{-}56)$$

Тогда тепловое сопротивление для радиального перемещения теплового потока, определяющее температуру корпуса закрытой машины, составит:

$$R_c = R_j + R_{\delta j} = \frac{1}{S_{\text{пар}}} \times \left(\frac{1}{\alpha_j} + \frac{1}{\alpha_{\delta j}}\right). \qquad (5\text{-}57)$$

На рис. 5-7 показана тепловая схема замещения для закрытой обдуваемой машины. В схему введены потери ротора P_p, включающие ме-

ханические потери в подшипниках машины (за исключением потерь на внешний вентилятор). Тепловые сопротивления $R_{из}$, $R_{пр}$, $R_л$, $R_с$ определяются аналогично предыдущему. Сопротивление $R_{в.кор}$ характеризует перепад температур $\vartheta_в - \vartheta_{кор}$ между нагретым внутренним воздухом и корпусом, сопротивление $R_{кор}$ — перепад температуры

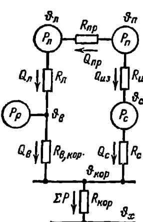


Рис. 5-7. Тепловая схема замещения закрытой обдуваемой машины.

корпуса относительно средней температуры охлаждающего наружного воздуха.

По (5-18) значение

$$R_{в.кор} = 1/\alpha S_{в.кор}, \quad (5\text{-}58)$$

где α определяется по (5-29) и табл. 5-4 при коэффициенте $k_0 = 0{,}07 \div 0{,}05$;

$S_{в,кор}$ — внутренняя поверхность корпуса, омываемая воздухом, включает свободную от магнитопровода статора внутреннюю цилиндрическую часть корпуса и две внутренние торцевые части подшипниковых щитов, м².

Тепловое сопротивление $R_{кор}$ определяется наружной теплорассеивающей поверхностью корпуса, большая часть которой относится к оребренной поверхности, а меньшая включает боковые поверхности подшипниковых щитов. Коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности определяется с учетом коэффициента $k_{реб}$ [см. (5-30)]:

$$\alpha'_{кор} = k_{реб}\,\alpha_{кор}, \quad (5\text{-}59)$$

где $\alpha_{кор}$ берется по рис. 5-2 с учетом уменьшения скорости воздуха на 40—60% вследствие отклонения воздушных струй, создаваемых наружным вентилятором машины при отсутствии колпака, закрывающего ребра. При наличии экранирующего колпака скорость воздуха определяется из вентиляционного расчета.

Коэффициент теплоотдачи боковой поверхности подшипникового щита со стороны вентилятора $\alpha''_{кор}$ может быть выбран по скорости обдува. Боковая поверхность подшипникового щита с противоположной стороны вентилятора охлаждается хуже, $\alpha'''_{кор}$ может быть взято равным коэффициенту α для спокойного воздуха из табл. 5-4. Результирующее тепловое сопротивление $R_{кор}$ определяется с учетом суммирования тепловых потоков с поверхностей $S'_{кор}$, $S''_{кор}$ и $S'''_{кор}$, имеющих коэффициенты теплоотдачи $\alpha'_{кор}$, $\alpha''_{кор}$ и $\alpha'''_{кор}$:

$$R_{кор} = \frac{1}{\alpha'_{кор} S'_{кор} + \alpha''_{кор} S''_{кор} + \alpha'''_{кор} S'''_{кор}} \quad (5\text{-}60)$$

Тепловая схема замещения на рис. 5-7 содержит 11 неизвестных, определяемых из 11 уравнений. Окончательные расчетные формулы для превышений температур обмотки и магнитопровода получаются громоздкими и неудобными для расчета.

В асинхронных машинах малой и средней мощности (до 250 кВт) температура пазовой части обмотки $\vartheta_п$ отличается от температуры лобовых частей $\vartheta_л$ незначительно. В тепловой схеме на рис. 5-7 это означает отсутствие теплового сопротивления $R_{пр}$. Приняв $R_{пр}=0$, получим упрощенную тепловую схему замещения закрытой асинхронной машины (рис. 5-8) с шестью неизвестными.

Решение системы шести уравнений с шестью неизвестными даст следующие расчетные формулы среднего превышения температуры

над температурой охлаждающего воздуха ϑ_x:

для обмотки статора

$$\Delta\vartheta_{п1} = \frac{P_п (R_с - R_{пэ}) + P_с R_с + P_р R_{в.кор} \dfrac{R_с + R_{в.кор}}{R_л + R_{в.кор}}}{1 + \dfrac{R_с + R_{пэ}}{R_л + R_{в.кор}}}; \quad (5\text{-}61)$$

для сердечника статора

$$\Delta\vartheta_с = \frac{P_с R_{иэ} + \vartheta_п}{1 + R_{иэ}/R_с} + \Delta\vartheta_{кор}; \quad (5\text{-}62)$$

для корпуса

$$\Delta\vartheta_{кор} = (P_п + P_с + P_р) R_{кор}, \quad (5\text{-}63)$$

где $P_п$, $P_с$, $P_р$ — потери в обмотке статора, сердечниках статора и ротора, Вт.

Тепловые сопротивления определяют по приведенным формулам.

Расчет электрических потерь в обмотках при определении среднего значения превышения температуры производят по сопротивлению обмотки. Это сопротивление рассчитывают по максимально допустимой температуре обмотки, равной допустимому превышению температуры, указанному в табл. 5-1, в зависимости от класса нагревостойкости изоляции обмотки плюс 40° С (что дает некоторый «тепловой запас»).

Тепловая схема якоря машины постоянного тока из-за тепловой связи обмотки якоря с коллектором значительно осложняет ее расчет. Поэтому обычно для якоря применяют упрощенную тепловую схему (рис. 5-5, *в*). Нагревание коллектора рассчитывают отдельно по формуле

$$\Delta\vartheta_{кол} = \frac{P_{кол}}{\alpha_{кол} S_{кол}}, \quad (5\text{-}64)$$

где $P_{кол}$ — полные потери на коллекторе;

$\alpha_{кол}$ — коэффициент теплоотдачи коллектора по (5-28);

$S_{кол}$ — теплорассеивающая поверхность коллектора, м²:

$$S_{кол} \approx \pi D_{кол} l_{кол}$$

($D_{кол}$, $l_{кол}$ — диаметр и длина коллектора).

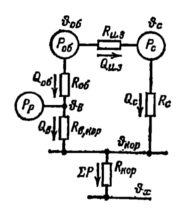


Рис. 5-8. Упрощенная тепловая схема замещения обдуваемой машины.

5-6. УПРОЩЕННЫЕ ФОРМУЛЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

Выше отмечалось, что тепловой расчет может дать большие отклонения расчетных превышений температур от действительно наблюдаемых. Но даже приблизительные данные превышений температур, позволяя выяснить картину тепловой напряженности отдельных частей машины, представляют большую ценность при расчете машины.

Ниже приводятся упрощенные формулы теплового расчета, применяемые в заводской практике для нормальных машин защищенного исполнения. Они базируются на следующих допущениях. Принимается, что все потери, выделяемые в пределах активной длины стали статора (или ротора), отводятся с цилиндрической охлаждаемой поверхности статора (или ротора), а потери в лобовых частях обмотки — с охлаждаемой поверхности этих частей. При этих допущениях по приведенным выше расчетным формулам определяют отдельно превышение температуры $\Delta\vartheta_1$ части обмотки, находящейся в пределах l_1 активной длины стали, и отдельно — превышение температуры $\Delta\vartheta_2$ лобовых частей на длине l_2 лобовых частей.

Среднее превышение температуры $\Delta\vartheta_2$ всей обмотки

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta\vartheta_1 l_1 + \Delta\vartheta_2 l_2}{l_1 + l_2}. \quad (5\text{-}65)$$

Ниже приводятся упрощенные формулы теплового расчета для отдельных видов машин.

а) Машины постоянного тока

Якорная обмотка. 1. Перепад температуры в изоляции якорной обмотки, °С,

$$\Delta\vartheta_{из} = \frac{\rho_\vartheta A J k_f t b_{из}}{\lambda_{из} П}, \quad (5\text{-}66)$$

где A — линейная нагрузка якоря, А/м;
J — плотность тока в обмотке якоря, А/м²;
k_f — коэффициент увеличения потерь в обмотке;
t — зубцовое деление, м;
$b_{из}$ — толщина изоляции, м;
$П$ — периметр паза, м;
ρ_ϑ — удельная проводимость меди из табл. 4-1.

2. Превышение температуры внешней поверхности якоря над температурой охлаждающего воздуха рассчитывают по (5-16). Предварительно определяют удельный тепловой поток q_a, Вт/м², приходящийся на единицу внешней цилиндрической поверхности якоря, включая при аксиальной вентиляции поверхность аксиальных вентиляционных каналов:

$$q_a = \frac{\rho_\vartheta A J k_f}{\left(1 + \frac{m_к d_к}{D}\right)} + \frac{P_c}{\pi D l_1 \left(1 + \frac{m_к d_к}{D}\right)}, \quad (5\text{-}67)$$

где D — диаметр якоря, м;
$m_к$ — число аксиальных вентиляционных каналов;
$d_к$ — диаметр аксиального вентиляционного канала, м;
l_1 — длина якоря, м.

При радиальной вентиляции принимается

$$n_в d_в = 0.$$

Коэффициент теплоотдачи α_v, Вт/(м²·°С), в формуле (5-16):

при радиальной вентиляции

$$\alpha_v = 66(1 + 0{,}1 v_a),$$

где окружная скорость якоря, м/с,

$$v_a = \pi D n/60; \quad (5\text{-}68)$$

при аксиальной вентиляции

$$\alpha_v = 22(1 + 0{,}1 v_{вен}), \quad (5\text{-}69)$$

где окружная скорость вентилятора, м/с,

$$v_{вен} = \pi D_{вен} n/60$$

($D_{вен}$ — внешний диаметр вентилятора, м).

Подставив (5-67) и (5-68) в (5-16), найдем искомое превышение температуры, °С,

$$\Delta\vartheta_{пов a} = q_a/\alpha_v. \quad (5\text{-}70)$$

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха. Значение $\Delta\vartheta_л$ находят по (5-16). Удельный тепловой поток $q_л$ внешней поверхности лобовых частей, Вт/м², определяется только потерями в них. Учитывая, что аксиальная длина внешней охлаждаемой поверхности лобовых частей, укрепленных на обмоткодержателях, уменьшится по сравнению с длиной лобовой части $l_л$ полувитка в отношении $l_л/2l_в$, где $l_в$ — односторонняя длина вылета лобовых частей, получим:

$$q_л = 1{,}4 A J/\gamma_\vartheta. \quad (5\text{-}71)$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_v = 30(1 + 0{,}1 v),$$

где v — окружная скорость якоря при радиальной вентиляции или вентилятора при аксиальной вентиляции, м/с.

Превышение температуры поверхности лобовых частей над температурой охлаждающего воздуха составит, °С.

$$\Delta\vartheta_л = q_л/\alpha_v. \quad (5\text{-}72)$$

4. Среднее превышение температуры обмотки якоря (5-65), °С,

$$\Delta\vartheta_a \approx \frac{(\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов a}) l_1 + \Delta\vartheta_л l_л}{l_1 + l_л}. \quad (5\text{-}73)$$

Обмотка возбуждения. Превышение температуры обмоток возбуждения слагается из перепада температур внутри катушек воз-

буждения и между внешней поверхностью катушек и охлаждающим воздухом. Определение перепада температур в толще катушек возбуждения, выполняемых обычно из ряда слоев, представляет большие трудности. Для большинства машин нормального исполнения можно принять на основании опыта, что

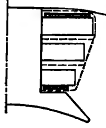


Рис. 5-9. Теплорассеивающая поверхность катушки возбуждения (периметр поверхности показан пунктиром).

перепад температур внутри многослойных катушек составляет около 25% превышения температуры внешней поверхности над температурой охлаждающего воздуха.

Удельный тепловой поток, Вт/м², приходящийся на единицу теплорассеивающей поверхности катушек, определяется потерями в обмотке возбуждения $P_{э,в}$ и площадью $S_в$ этой поверхности:

$$q_в = P_{э,в}/S_в. \quad (5\text{-}74)$$

Если принять коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(°С·м²),

$$\alpha_v = 5\left(1 + 0{,}7\sqrt{v_a}\right), \quad (5\text{-}75)$$

то площадь $S_в$ должна быть рассчитана как среднее арифметическое площади поверхности, омываемой воздухом, и поверхности теплоизлучения, показанной пунктиром на рис. 5-9.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения, °С,

$$\Delta\vartheta_в = q_в/\alpha_v. \quad (5\text{-}76)$$

Формула (5-76) пригодна как для обмоток возбуждения главных полюсов, так и для многослойных обмоток добавочных полюсов.

Коллектор. Превышение температуры внешней поверхности коллектора над температурой охлаждающего воздуха определяется потерями на коллекторе и может быть рассчитано по (5-70).

б) Асинхронные машины

Статорная обмотка. 1. Перепад температур в изоляции статора $\Delta\vartheta_{из}$ рассчитывается по (5-66).

2. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха. В асинхронных машинах за охлаждаемую поверхность статора при радиальной вентиляции условно принимают поверхность по внутреннему диаметру статора D, а при аксиальной вентиляции — наружную поверхность по внешнему диаметру статора D_a. Соответственно расчетные формулы для удельного теплового потока, Вт/м², приходящегося на единицу охлаждаемых поверхностей статора, принимают следующий вид:

для машин с радиальной вентиляцией

$$q_c = \frac{AJk_f}{\gamma_\vartheta} + \frac{P_{c1} + 0{,}5P_{доб}}{\pi D l_1}; \quad (5\text{-}77)$$

для машин с аксиальной вентиляцией

$$q_c = \frac{\rho_\vartheta AJk_f D}{D_a} + \frac{P_{c1} + 0{,}5P_{доб}}{\pi D_a l_1}, \quad (5\text{-}78)$$

где P_{c1} — потери в стали статора при холостом ходе, Вт;

$P_{доб}$ — добавочные нагрузочные потери. Принято, что добавочные нагрузочные потери, составляющие для асинхронных машин 0,5%, распределяются поровну между статором и ротором.

Коэффициент теплоотдачи, Вт/ /(°С·м²), охлаждаемой поверхности статора

$$\alpha_v = \alpha_0(1 + 0{,}1v), \quad (5\text{-}79)$$

где $\alpha_0 = 66$ — для радиальной вентиляции; $\alpha_0 = 33$ — для аксиальной вентиляции;

v — окружная скорость ротора при радиальной вентиляции и вентилятора при аксиальной вентиляции, м/с.

Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха, °С,

$$\Delta\vartheta_{пов.с} = q_c/\alpha_\vartheta. \quad (5\text{-}80)$$

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха. Так как лобовые части обмотки статора обычно образуют своеобразную решетку, продуваемую воздухом, то они охлаждаются почти по всему периметру поперечного сечения каждой якорной секции. Соответственно этому плотность теплового потока, Вт/м², на единицу охлаждаемой поверхности лобовых частей равна:

$$q_л = \rho_\vartheta A J t_1 / П_1, \quad (5\text{-}81)$$

где t_1 — зубцовое деление статора, м;
$П_1$ — периметр поперечного сечения паза статора, м;
A — линейная нагрузка, А/м;
J — плотность тока в статоре, А/м²;
ρ_ϑ — удельное сопротивление при температуре ϑ.

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей статора, °С,

$$\Delta\vartheta_л = \frac{q_л}{13,3(1+0,07v)}, \quad (5\text{-}82)$$

где v — окружная скорость ротора при радиальной вентиляции или вентилятора при аксиальной вентиляции, м/с.

4. Превышение температуры обмотки статора. Среднее значение превышения температуры обмотки статора, °С, по (5-65)

$$\Delta\vartheta_{об.с} = \frac{(\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов.с})\, l_1 + (\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_л)\, l_л}{l_1 + l_л}, \quad (5\text{-}83)$$

где l_1 — полная длина статора, м;
$l_л$ — длина лобовой части обмотки статора, м.

Обмотка фазного ротора. 1. Перепад температур в изоляции обмотки ротора рассчитывается по (5-66).

2. Превышение температуры внешней поверхности ротора над температурой охлаждающего воздуха. Удельный тепловой поток, Вт/м², приходящийся на единицу внешней цилиндрической поверхности ротора, включая при аксиальной вентиляции охлаждаемую поверхность вентиляционных аксиальных каналов, определяют по формуле, аналогичной (5-67):

$$q_р = \frac{\rho_\vartheta A_р J}{1 + \frac{m_к d_к}{D}} + \frac{P_{c2} + 0,5 P_{доб}}{\pi D l_2 \left(1 + \frac{m_к d_к}{D}\right)}, \quad (5\text{-}84)$$

где P_{c2} — потери в стали ротора при холостом ходе, Вт;
$P_{доб}$ — добавочные нагрузочные потери, Вт;
l_2 — полная длина ротора, м;
$A_р$ — линейная нагрузка ротора, А/м;
J — плотность тока обмотки ротора, А/м²;
D — внешний диаметр ротора, равный приблизительно внутреннему диаметру статора, м;
$m_к$ и $d_к$ — число и диаметр вентиляционных аксиальных каналов; при радиальной вентиляции принимают $m_к = d_к = 0$.

Значение коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_v = \alpha_0 = (1 + 0,1v), \quad (5\text{-}85)$$

где

$$\alpha_0 = 40 \div 33 \text{ Вт/(м}^2\cdot{}^\circ\text{С)}$$

(v — окружная скорость ротора или вентилятора, м/с).

Превышение температуры поверхности ротора, °С,

$$\Delta\vartheta_{пов.р} = q_р / \alpha_v. \quad (5\text{-}86)$$

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей ротора над температурой охлаждающего воздуха. Значение $\Delta\vartheta_л$ рассчитывается по (5-73).

4. Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой охлаждающего воздуха. Исходное значение превышения температуры обмотки ротора опре-

деляется по (5-65):

$$\Delta\vartheta_{об.р}=\frac{(\Delta\vartheta_{из}+\Delta\vartheta_{пов.р})\,l_2+\Delta\vartheta_л\,l_л}{l_2+l_л}, \quad (5\text{-}87)$$

где l_2 — полная длина ротора, м;
$l_л$ — длина лобовой части обмотки ротора, м.

Контактные кольца. Нагрев контактных колец при постоянно налегающих щетках может быть рассчитан по (5-64), если принять в ней за $D_{кол}$ и $l_{кол}$ диаметр и суммарную аксиальную длину внешней поверхности колец.

в) Синхронные машины

1. Перепад температуры в изоляции обмотки статора определяется по (5-66).

2. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха определяется по (5-16). Удельный тепловой поток q_c, Вт/м², на единицу цилиндрической внутренней поверхности статора

$$q_c=\frac{P_{в.с}+P_{доб.с}+P_{ci}}{\pi D l_i}=$$

$$=\rho_\vartheta AJ\left(1+k_f\frac{l_{ср}}{l_i}\right)+\frac{P_{ci}}{\pi D l_1}; \quad (5\text{-}88)$$

где P_{c1} — потери в стали при холостом ходе, Вт;
k_f — коэффициент добавочных потерь при нагрузке;
A — линейная нагрузка статора, А/м;
J — плотность тока в обмотке статора, А/м²;
D и l — внутренний диаметр и длина статора, м;
$l_{ср}$ — средняя длина полувитка обмотки статора, м.

Искомое превышение температуры охлаждаемой поверхности статора находят с учетом (5-96):

$$\Delta\vartheta_{пов.с}=\frac{q_c}{\alpha(1+0{,}1v)}, \quad (5\text{-}89)$$

где значения α в зависимости от отношения длины статора l_1 к полюсному делению τ могут быть приняты равными:

$\alpha=80$ Вт/(°С·м²) при $l_1/\tau\leqslant 2$;

$\alpha=66$ Вт/(°С·м²) при $2\leqslant l_1/\tau\leqslant 4$;

$\alpha=57$ Вт/(°С·м²) при $4\leqslant l_1/\tau\leqslant 5$;

v — окружная скорость ротора, м/с.

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей статора синхронных машин рассчитывается так же, как в асинхронных машинах. Удельный тепловой поток $q_л$ находится по (5-81).

Превышение температуры составит, °С,

$$\Delta\vartheta_л=\frac{q_л}{\alpha(1+0{,}07v)}, \quad (5\text{-}90)$$

где значения α, Вт/(°С·м²), в зависимости от полюсного деления могут быть приняты равными: $\alpha=133$ при $\tau\leqslant 0{,}4$ м; $\alpha=10$ при $0{,}4\text{ м}\leqslant\tau\leqslant 0{,}6$ м; $\alpha=6{,}6$ при $\tau>0{,}6$ м; v — окружная скорость ротора, м/с.

4. Среднее превышение температуры обмотки статора. Искомое превышение температуры обмотки статора находится по (5-83).

5-7. СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ОХЛАЖДЕНИИ

Вентиляция электрических машин может быть естественной, без применения особых охлаждающих устройств (вентиляторов и т.п.), и искусственной, с применением таких устройств.

Естественное охлаждение применяется, как правило, только в машинах мощностью до 1 кВт и в открытых машинах с относительно невысоким использованием активных материалов.

Это объясняется тем, что с ростом мощности и размеров машины значительно быстрее возрастает удельная тепловая нагрузка на охлаждающую поверхность. В результате увеличивается нагрев машины, что приводит к необходимости повышения интенсивности охлаждения с применением искусственных средств.

Машины с искусственной вентиляцией разделяются на машины с *самовентиляцией* и машины с *независимой вентиляцией*.

Самовентилируемые машины

имеют систему вентиляции, при которой активные части непосредственно охлаждаются потоком воздуха или газа, нагнетаемого вентилятором, помещенным на роторе машины.

В машинах с независимой вентиляцией охлаждающая среда (газообразная или жидкая) подается в машину специальным устройством (вентилятором или насосом),

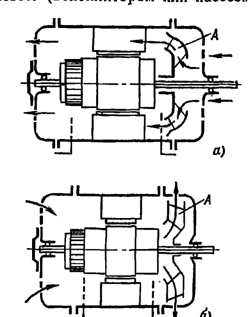


Рис. 5-10. Аксиальная вентиляция.
а — нагнетательная; б — вытяжная.

имеющим отдельный двигатель. Чаще всего этот двигатель монтируется на корпусе охлаждаемой машины.

В зависимости от характера работы встроенного вентилятора различают вентиляцию нагнетательную (рис. 5-10, *а*) и вытяжную (рис. 5-10, *б*). Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что в машину попадает холодный воздух без предварительного его подогрева при прохождении через вентилятор за счет потерь в последнем. Следует иметь в виду, что даже незначительный подогрев воздуха из-за потерь в вентиляторе (3—7° С) вынуждает прогонять через машину большее (на 15—20%) количество воздуха, что снижает эффективность вентиляции.

В зависимости от направления охлаждающих потоков воздуха или газа внутри машины различают вентиляцию радиальную и аксиальную.

При радиальной вентиляции охлаждающие потоки движутся радиально относительно оси вала машины по радиальным вентиляционным каналам, образованным в шихтованных сердечниках статора и ротора путем разделения общей длины активной стали на отдельные пакеты шириной 40—80 мм. Между пакетами оставляют промежутки, которые и выполняют роль радиальных вентиляционных каналов. В нормальных машинах ширина радиального канала принимается равной 10 мм.

Конструктивно радиальные каналы образуются размещением между пакетами особых дистанционных распорок, которые приклеиваются или привариваются к крайним утолщенным листам пакетов статора и ротора. При вращении ротора его распорки — ветреницы выполняют также функцию вентиляторных лопаток, прогоняющих воздух или газ в радиальных каналах. В машинах с малым воздушным зазором, например в асинхронных двигателях, следует тщательно производить сборку и насадку пакетов ротора и статора, чтобы роторные и статорные радиальные каналы точно пришлись друг против друга.

В радиальной системе вентиляции синхронных машин при так называемой согласно-радиальной системе охлаждающий поток движется от центра к периферии статора. При встречно-радиальной системе вентиляции поток движется в обратном направлении. Для встречного движения охлаждающего потока применяется принудительный подвод воздуха в машину от независимого вентилятора. Встречно-радиальная система вентиляции благодаря принудительному нагнетанию воздуха от постороннего вентилятора обеспечивает более равномерное распределение воздушного потока по радиальным каналам, а следовательно, и более равномерное охлаждение машины.

Аксиальная система вентиляции конструктивно проще радиальной, требующей пакетировки магнитопроводов статора и ротора. Однако при большой длине пакета может возникнуть значительная неравномерность нагрева машины вдоль оси.

На основании данных практики считается, что аксиальная вентиляция может применяться при отношении длины магнитопровода ротора к диаметру ротора не более 1,2. В зависимости от диаметра якоря для машины постоянного тока приближенные значения этого отношения составляют: 1—1,2 при $D=$ $=200$ мм; 0,8 при $D=300$ мм; 0,65 при $D=500$ мм; 0,5—0,6 при $D=$ $=600$ мм; 0,5 при $D=740$ мм и 0,5 при $D=840$ мм. В машинах постоянного тока с диаметром ротора до 200—250 мм применяют, как правило, аксиальную вентиляцию, так как при таких диаметрах выполнить конструктивно радиальную вентиляцию трудно. Кроме того, эффективность радиальной вентиляции в этом случае не выше эффективности аксиальной вентиляции. Однако при радиальной вентиляции для машин с частотой вращения выше 600—750 об/мин можно обойтись без вентилятора на валу, что исключается при аксиальной. Последний вид самовентиляции требует установки вентилятора на валу машины. Принудительное движение охлаждающего воздуха около лобовых частей обмоток статора может осуществляться вентилирующим действием крылышек, пристроенных к концам стержней обмотки ротора асинхронной машины или якоря машины постоянного тока.

В асинхронных короткозамкнутых двигателях с литой алюминиевой беличьей клеткой вентиляционные лопатки составляют одно целое с короткозамыкающими торцевыми кольцами клетки. Так как развиваемое такими лопатками давление воздуха невелико, стремятся по возможности уменьшить входное сопротивление для воздуха, поступающего в машину.

В синхронных машинах с явно выраженными полюсами сильное вентилирующее действие создают полюсы ротора. При согласно-радиальной системе вентиляции машины с соотношением $l/\tau=1{,}5\div2$ выполняют без особых вентиляторов. В более длинных машинах ставят отдельные вентиляторы или пристраивают к торцам ротора ковшевидные лопатки.

Машины с наружной самовентиляцией или обдуваемые являются машинами с закрытым исполнением, предназначенными для работы в помещениях с парами, разъедающими изоляцию обмоток, запыленным воздухом, взрывоопасными газами, для работы на открытом воздухе и т. п.

Наружный вентилятор устанавливают на выступающем конце вала машины. Так как наружная поверхность станины является основной теплорассеивающей поверхностью, то для повышения теплорассеяния эту поверхность выполняют ребристой или же прогоняют воздух через особые аксиальные трубки, расположенные внутри станины. Для усиления теплопередачи от внутренних частей закрытой машины к наружной ее поверхности внутри машины иногда осуществляют перемешивание воздуха посредством особого вентилятора-мешалки. Применение внешнего обдува в закрытых машинах позволило значительно увеличить их мощность. Обдуваемые машины могут давать до 60—80% номинальной мощности машины тех же габаритов с внутренней самовентиляцией или открытого исполнения.

Независимая вентиляция характеризуется наличием внешнего вентилятора, скорость которого не зависит от частоты вращения охлаждаемой машины. Она применяется в машинах с низкой частотой вращения или широким диапазоном регулирования частоты вращения. В асинхронных и синхронных машинах независимая вентиляция находит применение наряду с самовентиляцией при недостаточной производительности последней. Независимая вентиляция может быть выполнена по разомкнутому или замкнутому циклу движения ох-

лаждающего потока. При разомкнутом цикле вентиляции охлаждающий воздух подается в машину внешним вентилятором. Из машинного зала воздух проходит, как правило, через воздухоохладитель, а выбрасывается в машинный зал нагретым.

При замкнутом цикле вентиляции охлаждающий воздух или газ циркулирует в замкнутом воздуховоде. В воздуховоде перед машиной установлен воздухоохладитель, в котором происходит теплообмен между нагретым воздухом и охлаждающей холодной водой. При этом обычно перед вентилятором создается давление воздуха, равное атмосферному. Тогда во всех других частях воздуховода давление воздуха будет выше атмосферного, что исключит подсос воздуха через неплотности из помещения, а вместе с ним пыли и паров масла. Вследствие неизбежной утечки воздуха его пополнение производится через фильтр, установленный в месте, где давление в воздуховоде равно атмосферному.

Замкнутый цикл движения охлаждаемого газа может быть и при системе самовентиляции. Такая система охлаждения является общепринятой для турбо- и гидрогенераторов и синхронных компенсаторов.

В последние годы в мощных турбогенераторах нашло широкое применение непосредственное (внутреннее) охлаждение проводников обмоток статора и ротора. При этом способе охлаждения охлаждающая среда (водород или вода) проходит по каналам, выполненным внутри проводников. Разработана конструкция непосредственного водяного охлаждения проводников не только обмотки статора, но и ротора.

В Советском Союзе применяется водяное охлаждение обмоток статора крупных гидрогенераторов (гидрогенератор Красноярской ГЭС мощностью 500 МВт), а также полное водяное охлаждение, когда вода используется для охлаждения обмоток статора и ротора (гидрогенератор Саяно-Шушенской ГЭС, P_2=640 МВ·А).

5-8. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ

При вентиляционном расчете машины должно быть определено количество воздуха, которое необходимо ежесекундно прогонять через машину и давление (напор), обеспечивающее прохождение требуемого количества воздуха.

Количество охлаждающего воздуха, подводимого к машине, не должно быть малым во избежание перегрева обмоток, но и не должно быть чрезмерным, так как иначе будут расти потери на вентиляцию и снизится КПД машины. Воздушный поток обычно отводит все тепло, обусловленное потерями в машине, за исключением тепла, выделяющегося в подшипниках. Последнее отводится или естественным теплорассеянием наружной поверхности подшипников, или маслом при циркуляционной смазке подшипников.

Необходимое количество охлаждающего воздуха, м³/с,

$$V_в = \frac{\Sigma P_в}{c_в \Delta\vartheta_в}, \qquad (5\text{-}91)$$

где $\Sigma P_в$ — потери, отводимые воздухом, Вт;

$c_в$ = 1100 Дж/(°С·м³) — теплоемкость воздуха;

$\Delta\vartheta_в = \vartheta_г - \vartheta_х$ — превышение температуры воздуха, °С;

$\vartheta_г$ — температура горячего воздуха при выходе его из машины, °С;

$\vartheta_х$ — температура холодного воздуха при входе его в машину, °С.

Значение подогрева воздуха $\Delta\vartheta_в$ может быть взято равным 20° С для машин с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В, до 30° С при изоляции классов F и Н, 25° С для турбо- и гидрогенераторов.

Ориентировочно значение подогрева колеблется в пределах от трети до четверти допустимого перегрева обмоток.

Согласно ГОСТ 183-74 допустимые превышения температуры обмоток установлены по отношению к условной температуре охлаждающего воздуха +40° С.

Опыт показывает, что для вентиляционной системы электрических машин можно принять с достаточной для практики точностью следующую зависимость между давлением вентилятора H, Па, и количеством воздуха, V, м³/с,

$$H = ZV^2, \qquad (5\text{-}92)$$

где Z — постоянная, Н·с²/м⁸ или Па·с²/м⁶.

Значение Z, как это будет показано ниже, зависит только от геометрических форм и размеров воздухопровода вентиляционной системы.

Уравнение (5-92) определяет характеристику воздухопровода. Из него следует, что характеристика воздухопровода электрической машины $H=f(V)$ представляет собой квадратичную параболу.

Для определения необходимого давления H требуется рассчитать постоянную Z, которую в дальнейшем будем называть аэродинамическим сопротивлением воздухопровода электрической машины:

$$Z = H/V^2. \qquad (5\text{-}93)$$

Давление H равно сумме потерь давления на всех участках воздухопровода, следующих один за другим по движению потока воздуха, плюс скоростное или динамическое давление движущегося воздуха, обладающего при выходе в атмосферу запасом кинетической энергии.

Динамическое давление H_d, Па, согласно теории гидродинамики равно:

$$H_d = \gamma \frac{v^2}{2} \approx \xi_d v^2, \qquad (5\text{-}94)$$

где $\gamma \approx 1{,}2$ кг/м³ — плотность воздуха;
v — скорость движущегося воздуха, м/с;
ξ_d — коэффициент динамического давления.

Коэффициент динамического давления

$$\xi_d = \gamma/2 \approx 1{,}2/2 = 0{,}6 \text{ Па·с}^2/\text{м}^2. \qquad (5\text{-}95)$$

Давление H_i, Па, создаваемое вентилятором для покрытия аэродинамических потерь в остальных участках воздухопровода, на основании теории гидродинамики также пропорционально квадрату скорости v_i^2 на соответствующем участке:

$$H_i = \xi_i v_i^2, \qquad (5\text{-}96)$$

где ξ_i — коэффициент аэродинамического сопротивления рассматриваемого участка воздухопровода;
v_i — скорость воздуха в рассматриваемом участке.

Полное давление на весь воздухопровод, включая потерю скоростного или динамического давления при выходе воздуха из машины, составит:

$$H = \Sigma H_i + H_d = \Sigma\left(\xi_i v_i^2\right) + \xi_d v_{\text{вых}}^2. \qquad (5\text{-}97)$$

На основании (5-93) и (5-97) аэродинамическое сопротивление воздухопровода, состоящего из последовательно включенных отдельных участков, определяют следующим образом:

$$Z = \Sigma\left(\xi_i \frac{v_i^2}{V^2}\right) + \xi_d \frac{v_{\text{вых}}^2}{V_{\text{вых}}^2} = \Sigma\left(\frac{\xi_i}{S_i^2}\right) + \frac{\xi_d}{S_{\text{вых}}^2} = \Sigma Z_i + Z_{\text{вых}}, \qquad (5\text{-}98)$$

так как количество воздуха во всех последовательно включенных участках воздухопровода остается неизменным:

$$V = V_i = V_i S_i = v_{\text{вых}} S_{\text{вых}}. \qquad (5\text{-}99)$$

Здесь Z_i — аэродинамическое сопротивление рассматриваемого участка воздухопровода:

$$Z_i = \xi_i / S_i^2; \qquad (5\text{-}100)$$

S_i — поперечное сечение рассматриваемого участка, м²;
$v_{\text{вых}}$ — скорость выходящего из машины воздуха, м/с;
$S_{\text{вых}}$ — поперечное сечение в месте выхода воздуха, м².

Из (5-100) следует, что аэродинамическое сопротивление является функцией геометрической формы участков воздухопровода. Значение

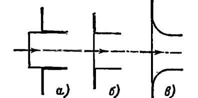


Рис. 5-11. Формы входных отверстий воздуховода.

коэффициента ξ_i аэродинамического сопротивления отдельных участков воздухопровода точно определить затруднительно ввиду сложной конфигурации воздухопровода электрической машины. Приходится использовать значения ξ_i, найденные опытным путем для простейших форм воздухопровода. Вентиляционный расчет на базе этих коэффициентов хотя и является приближенным, но он дает возможность оценить требования, предъявляемые к вентилятору, и позволяет установить узкие места воздухопровода, чрезмерно тормозящие движение воздуха. Рассмотрим эти коэффициенты.

При входе воздуха в машину имеет место потеря давления. В зависимости от формы края круглого входного отверстия коэффициенты сопротивления, найденные опытным путем, равны:

для выступающих или острых краев (рис. 5-11, *а*)

$$\xi_{вх} = 0{,}6 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2; \quad (5\text{-}101)$$

для прямоугольных краев (рис. 5-11, *б*)

$$\xi_{вх} = 0{,}3 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2; \quad (5\text{-}102)$$

для закругленных краев (рис. 5-11, *в*)

$$\xi_{вх} = 0{,}125 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2, \quad (5\text{-}103)$$

если радиус закругления r входного отверстия канала приият равным 0,1 d, где d — диаметр отверстия. Когда r приближается к d, то значение $\xi_{вх}$ стремится к нулю.

Значения $\xi_{вх}$ по (5-103) можно также принять при проходе воздуха через проволочную сетку.

Потеря давления при входе воздуха в отверстие канала, Па,

$$H_{вх} = \xi_{вх} v_{вх}^2, \quad (5\text{-}104)$$

где $v_{вх}$ — скорость воздуха во входном отверстии, м/с.

Всякие изменения в сечении воздухопровода вызывают потери давления. Чем больше изменяется сечение канала, тем больше потери давления.

Коэффициент аэродинамического сопротивления при внезапном расширении канала $\xi_{расш}$ определяют по формуле

$$\xi_{расш} = \xi_d\left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}}\right)^2 = 0{,}6\left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}}\right)^2. \quad (5\text{-}105)$$

При внезапном сужении канала значение коэффициента аэродинамического сужения $\xi_{суж}$ можно взять приближенно по формуле

$$\xi_{суж} = 0{,}35\left(1 - \frac{S_{min}}{S_{max}}\right). \quad (5\text{-}106)$$

В уравнениях (5-105) и (5-106) S_{min} — меньшее сечение канала в месте его изменения; S_{max} — большее сечение канала в месте его изменения. Оба сечения должны быть взяты в одинаковых единицах измерения.

Потеря давления, Па, при внезапном расширении сечения канала

$$H_{расш} = \xi_{расш} v^2; \quad (5\text{-}107)$$

при сужении сечения

$$H_{суж} = \xi_{суж} v^2, \quad (5\text{-}108)$$

где v — скорость воздуха в меньшем сечении канала, т. е. бо́льшая скорость, м/с.

Потери давления возникают, если канал постоянного сечения

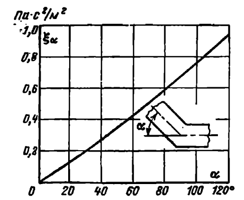


Рис. 5-12. Коэффициент аэродинамического сопротивления изгиба вентиляционного канала.

имеет поворот с острыми кромками (угол α, рис. 5-12). Значение коэффициента аэродинамического сопротивления ξ_α зависит от угла поворота α канала. Потеря давления, Па, при повороте составит:

$$H_\alpha = \xi_\alpha v^2, \qquad (5\text{-}109)$$

где v — скорость воздуха в канале, м/с.

При узких и относительно длинных каналах воздухопровода приходится учитывать потери давления от трения движущегося воздуха о стенки канала.

Для круглых каналов значение коэффициента аэродинамического сопротивления от трения воздуха, Па·с²/м², можно рассчитать по формуле

$$\xi_{тр} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\gamma}{2} = \lambda \frac{l}{d} \xi_\alpha = 0{,}6\lambda \frac{l}{d}, \qquad (5\text{-}110)$$

где λ — коэффициент трения о стенки канала;
l и d — длина и диаметр канала в одинаковых единицах.

Для расчета трения в аксиальных каналах электрических машин с достаточной для целей практики точностью можно принять

$$\lambda = 0{,}08.$$

В этом случае расчетная формула для коэффициента $\xi_{тр}$, Па·с²/м², принимает следующий вид:

$$\xi_{тр} = 0{,}05 \frac{l}{d}. \qquad (5\text{-}111)$$

Если канал имеет прямоугольное сечение, то вместо d следует ввести эквивалентный диаметр

$$d_э = \frac{2ab}{a+b}, \qquad (5\text{-}112)$$

где a и b — размеры сторон прямоугольного сечения канала.

Если $a \gg b$, то принимают $d_э = b$.

Для каналов произвольного сечения эквивалентным диаметром можно считать диаметр круга, приблизительно равного по площади рассматриваемому сечению.

Потери давления, Па, от трения движущегося воздуха в данном канале составят:

$$H_{тр} = \xi_{тр} v^2, \qquad (5\text{-}113)$$

где v — скорость воздуха в канале, м/с.

Для вентиляционного расчета следует иметь чертежи продольного и поперечного разрезов электрической машины. По этим чертежам выясняют пути воздушных потоков.

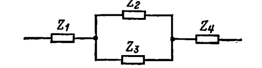


Рис. 5-13. Схема замещения сложного воздуховода.

Для этого накладывают на чертеж продольного разреза машины лист прозрачной бумаги (кальки) и набрасывают мягким карандашом линии воздушных струй с возможными их поворотами, плавным и резким сужением, разделением на параллельные струи и т. д. По окончательно установленной картине этих струй и данным поперечных сечений каналов производят расчет аэродинамических сопротивлений отдельных участков воздухопровода. При вентиляционном расчете приводят описание характеристики воздухопровода, поперечное сечение участка S_i, коэффициент аэродинамического сопротивления участка ξ_i, аэродинамическое сопротивление участка Z_i.

Суммируя значения Z_i в отдельных параллельных воздухопроводах, составляют схему замещения (рис. 5-13). Затем на основании такой схемы находят результирующее аэродинамическое сопротивление Z всей вентиляционной системы машины.

5-9. ВЕНТИЛЯТОРЫ

Встроенный вентилятор, укрепленный на валу электрической машины, должен создавать давление, достаточное для того, чтобы прогнать через машину необходимое количество воздуха.

Различают три типа вентиляторов, встраиваемых в электрическую машину: центробежный (рис. 5-14),

осевой или пропеллерный (рис. 5-15) и комбинированный, объединяющий особенности центробежного и осевого.

В электрических машинах чаще всего применяются центробежные вентиляторы, так как они создают

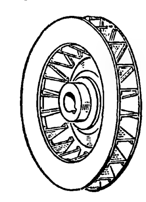


Рис. 5-14. Центробежный вентилятор.

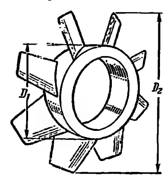


Рис. 5-15. Осевой вентилятор.

давление, более всего соответствующее характеристикам вентиляционных систем электрических машин, и пригодны для реверсивных машин.

Принцип действия центробежного вентилятора заключается в том, что при вращении колеса с лопатками воздух, находящийся между лопатками, под действием центробежной силы выбрасывается наружу. При этом внутри вентиляторного колеса у входных отверстий образуется разрежение воздуха, а у выхода на внешнем диаметре вентиляторного колеса — повышение давления.

Основной недостаток центробежных вентиляторов заключается в их сравнительно низком КПД. В то время как КПД центробежного вентилятора с радиальными лопатками составляет 0,2, КПД осевого вентилятора достигает 0,8. Осевой вентилятор применяется в высокоскоростных машинах, например турбогенераторах. Комбинированный вентилятор из-за относительной сложности изготовления применяется сравнительно редко.

Рассмотрим подробнее центробежные вентиляторы. В зависимости от частоты вращения и необходимости реверса центробежные вентиляторы могут иметь три основные формы лопаток. Для реверсивных машин лопатки устанавливаются радиально (рис. 5-16, *а*). Для тихоходных нереверсивных машин наружные концы лопаток отгибаются по вращению колеса вентилятора (рис. 5-16, *б*). Для быстроходных нереверсируемых машин наружные концы лопаток отгибаются против вращения колеса (рис. 5-16, *в*).

Независимо от типа лопаток вентиляторное колесо может работать при вращении в любую сторону. Однако вентиляторы с наклонными лопатками, выполненные для одного направления вращения, работают при обратном направлении менее производительно и с худшим КПД. Характеристики вентилятора, т. е. зависимости статического давления

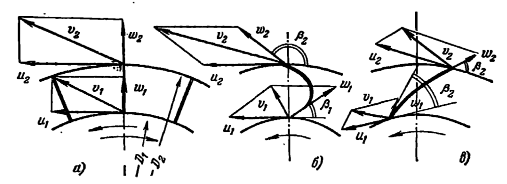


Рис. 5-16. Типы лопаток и диаграммы скоростей центробежных вентиляторов.

а — радиальные лопатки; *б* — с наклоном внешнего края по направлению вращения; *в* — с наклоном против вращения.

H, развиваемого вентилятором, в функции расхода воздуха V при различных типах лопаток, приведены на рис. 5-17. Характеристики построены в относительных единицах. Там же даны кривые энергетического КПД $\eta_э$ вентиляторов.

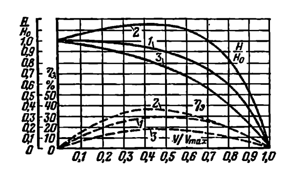


Рис. 5-17. Характеристики центробежных вентиляторов.

1 — для лопаток, направленных против вращения; *2* — для лопаток, наклоненных по вращению; *3* — для радиальных лопаток.

В теории вентиляторов указывается, что статическое давление, Па, развиваемое вентилятором, может быть рассчитано по формуле

$$H = \eta_a \gamma [u_2 v_2 \cos(u_2 v_2) - u_1 v_1 \cos(u_1, v_1)], \quad (5\text{-}114)$$

где η_a — аэродинамический КПД крыльев, учитывающий потери давления в самом вентиляторе;

$\gamma = 1,2$ кг/м^3 — плотность воздуха;

u_1 и u_2 — векторы окружных скоростей по внутреннему и наружному диаметрам лопаток, м/с (рис. 5-16);

v_1 и v_2 — векторы абсолютных скоростей движения частиц воздуха в окружающем пространстве, м/с.

Абсолютные скорости воздуха получаются в результате геометрического сложения вектора и окружной скорости u и средней относительной скорости w частиц воздуха относительно стенок лопаток.

На характеристиках вентиляторов (рис. 5-17) можно отметить две точки работы: 1) холостой ход вентилятора, когда последний развивает статическое давление H_0 при отсутствии расхода воздуха ($V=0$), что соответствует точке $H/H_0=1$ и $V/V_{max}=0$; 2) точка максимального расхода V_{max} при давлении $H=0$. Эту точку называют точкой короткого замыкания.

Осуществить холостой ход вентилятора можно, если закрыть все отверстия по наружному диаметру вентиляторного колеса сплошной лентой (например, бумажной). В этом случае частицы воздуха, находящиеся между лопатками колеса, давят под действием центробежных сил на каждый метр ленты с силой H_0. Количество воздуха V, прогоняемое через вентилятор, будет равно нулю.

Создать режим «короткого замыкания» вентилятора можно при отсутствии внешнего аэродинамического сопротивления, т. е. при работе вентилятора непосредственно в атмосферу. В этом случае давление H, создаваемое вентилятором, равно нулю, а количество воздуха, проходящее через вентилятор, является наибольшим V_{max}.

Из треугольника скоростей на рис. 5-16 видно, что для лопаток с любым профилем при холостом ходе вентилятора, когда $V=0$ и относительные скорости $w_1=w_2=0$, абсолютные скорости частиц воздуха v_1 и v_2 равны окружным скоростям u_1 и u_2. При этом углы между соответствующими векторами v и u равны нулю. В этом случае при холостом ходе вентилятора статическое давление, Па, развиваемое им, составит на основании (5-114):

$$H_0 = \eta_a \gamma (u_2^2 - u_1^2), \quad (5\text{-}115)$$

где η_a — аэродинамический КПД вентилятора при холостом ходе.

С точностью, достаточной для практики электромашиностроения, можно принять: для лопаток, наклоненных назад, $\eta_a=0,5$; для лопаток, наклоненных вперед, $\eta_a=0,75$; для радиальных лопаток $\eta_a=0,6$.

Для точки короткого замыкания ($H_0=0$) значение максимального расхода воздуха, м³/с, приближенно можно принять равным:

для лопаток, наклоненных назад относительно направления вращения вентилятора, при $\beta_1=\beta_2=25°$

$$V_{max}\approx 0{,}35u_2S_2; \qquad (5\text{-}116)$$

для лопаток, наклоненных вперед, при $\beta_1=25°$ и $\beta_2=155°$

$$V_{max}\approx 0{,}5u_2S_2; \qquad (5\text{-}117)$$

для радиальных лопаток при $\beta_1=\beta_2=90°$

$$V_{max}\approx 0{,}42u_2S_2, \qquad (5\text{-}118)$$

где S_2 — поперечное радиальное сечение для прохода воздуха на внешнем диаметре вентиляторного колеса:

$$S_2=0{,}92\pi D_2 b; \qquad (5\text{-}119)$$

D_2 — внешний диаметр вентилятора, м (рис. 5-14);

b — аксиальная ширина лопатки, м.

Максимум КПД при всех профилях лопаток имеет место примерно при половине максимального расхода воздуха. Поэтому желательно, чтобы номинальный расход вентилятора при работе его в машине был близок к половине максимального расхода. Обычно номинальный расход принимают в пределах 0,3—0,6 максимального.

Для вентиляторов с радиальными лопатками характеристика $H=f(V)$, выраженная в относительных единицах, может быть достаточно точно представлена следующим уравнением:

$$H/H_0=1-(V/V_{max})^2. \qquad (5\text{-}120)$$

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_в=HV/\eta_э, \qquad (5\text{-}121)$$

где H — статическое давление, развиваемое вентилятором при работе, Па;

V — номинальный расход воздуха, м³/с;

$\eta_э$ — энергетический КПД вентилятора.

Энергетический КПД вентилятора, называемый также механическим, учитывает затрату механической работы, расходуемой на вращение вентилятора. Он имеет следующие наибольшие значения для вентиляторов, применяемых в электромашиностроении:

при лопатках, наклоненных назад, $\eta_э=0{,}25\div0{,}30$; при лопатках, наклоненных вперед, $\eta_э=0{,}3\div0{,}4$;

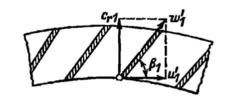


Рис. 5-18. Диаграмма скорости воздуха у входа в вентиляторные колеса.

при радиальных лопатках $\eta_э=0{,}15\div\div0{,}2$.

В вентиляторах с наклоненными лопатками с целью повышения КПД угол наклона входной кромки лопатки β_1 выбирается с учетом того, чтобы при номинальном режиме работы вентилятора получался безударный вход воздуха между лопатками. Для этого угол β выбирается таким образом, чтобы вектор w относительной скорости воздуха у входной кромки лопатки был направлен параллельно ее стенке (рис. 5-16). На рис. 5-18 c_{r1} — радиальная входная скорость воздуха, определяемая по количеству воздуха V в поперечном сечении вентиляторного колеса на его входной кромке.

Считая, что струя воздуха при входе в вентиляторное колесо закручивается, увлекаясь лопатками колеса примерно до $u_1/2$, получаем необходимый угол наклона лопатки:

$$\beta\approx \operatorname{arctg}\frac{2c_{r1}}{u_1}. \qquad (5\text{-}122)$$

Как видно, условие безударного входа может быть выполнено только для одного значения расхода воздуха V. Так как вентиляторы с наклоненными лопатками имеют максимум энергетического КПД при $V=(0{,}3\div0{,}6)\ V_{max}$, то условие безударного входа рассчитывают при указанном выше значении $V=c_{r1}S_1$.

Вентиляторы с радиальными лопатками вне зависимости от расхода

воздуха не могут иметь безударного входа, что приводит к снижению КПД вентилятора.

5-10. РАСЧЕТ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

В нормальных электрических машинах применяются главным образом вентиляторы с радиальными лопатками, поскольку они проще в изготовлении. Ниже приводится порядок расчета такого вентилятора.

Внешний диаметр вентиляторного колеса выбирается в соответствии с типом вентиляции и конструкции машины. При аксиальной вентиляции D_2 выбирают обычно максимально возможным. Современные электрические машины, являясь высокоиспользуемыми с большими электромагнитными нагрузками, требуют предельного форсирования вентиляции, что легче обеспечивается при большом значении D_2.

По выбранному внешнему диаметру D_2 вентилятора определяют окружную скорость u_2, м/с

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60}. \qquad (5\text{-}123)$$

Из условия максимального КПД принимается

$$V_{max} = 2V, \qquad (5\text{-}124)$$

где V — заданный номинальный расход воздуха, м^3/с.

Из (5-118) определяется сечение на выходной кромке вентилятора, м^2,

$$S_2 = \frac{V_{max} \cdot 60}{0{,}42 \pi D_2 n}. \qquad (5\text{-}125)$$

Из (5-119) находят ширину лопаток вентилятора, м,

$$b = \frac{S_2}{0{,}92 \pi D_2}. \qquad (5\text{-}126)$$

Внутренний диаметр колеса D_1 определяют из условия, что вентилятор работает при максимальном КПД, т. е. при $V = 0{,}5\ V_{max}$ и $H = 0{,}75\ H_0$, как это следует из уравнения характеристики вентилятора [см. (5-120) или рис. 5-17].

Давление, создаваемое вентилятором, должно быть достаточным, чтобы обеспечить заданный расход в вентиляционной системе машины.

Используя (5-92), получаем H_0, Па:

$$H_0 = \frac{H}{0{,}75} = \frac{ZV^2}{0{,}75}. \qquad (5\text{-}127)$$

С другой стороны, на основании уравнений (5-115)

$$\frac{ZV^2}{0{,}75 \gamma \eta_a} = u_2^2 - u_1^2. \qquad (5\text{-}128)$$

Отсюда окружная скорость на внутренней кромке вентиляционного колеса, м/с,

$$u_1 = \sqrt{u_2^2 - \frac{ZV^2}{0{,}75 \gamma \eta_a}}. \qquad (5\text{-}129)$$

Внутренний диаметр колеса D_1, м,

$$D_1 = \frac{60 u_1}{\pi n}. \qquad (5\text{-}130)$$

Во встроенных вентиляторах отношение диаметров составляет примерно 1,2—1,5.

Число лопаток вентиляторного колеса может быть ориентировочно определено по формуле

$$N_л = (6 \div 10) \frac{D_2}{D_2 - D_1}. \qquad (5\text{-}131)$$

Для уменьшения вентиляционного шума рекомендуется выбирать число лопаток вентилятора так, чтобы оно равнялось нечетному числу. При вытяжной вентиляции могут быть рекомендованы числа в зависимости от диаметра вентилятора следующих значений: 13 при 200 мм, 17 при 250 мм, 23 при 300 мм, 29 при 350 мм и 31 при 400 мм.

Размеры и число вентиляционных лопаток, отливаемых заодно с короткозамыкающим кольцом в асинхронных двигателях с литой алюминиевой обмоткой на роторе, выбирают из технологических соображений.

В заключение расчета определяют мощность, потребляемую вентилятором, Вт,

$$P_в = HV/\eta_э. \qquad (5\text{-}132)$$

В системе координат H—V следует построить характеристику *2* воздухопровода электрической машины по уравнению (5-92) и характеристику *1* вентилятора. Пересечение характеристик дает рабочую точку номинального режима вентилятора (рис. 5-19).

Конструкция вентилятора должна быть достаточно жесткой. Необходимо делать закругление входных и выходных кромок лопаток и округлять острые края отверстий в щите для входа и выхода воздуха. В месте выброса воздуха из вентилятора иногда устраивают камеру расширения, располагаемую в пространстве между внешней окружностью вентилятора и стенкой подшипникового щита. Такая камера заметно снижает шум и вентиляционные потери. Целесообразно применение проволочных сеток вместо штампованных для закрытия входных и выходных отверстий в щите.

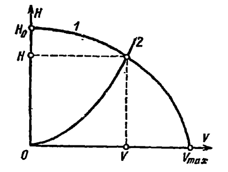


Рис. 5-19. Определение рабочей точки на характеристике вентилятора.

При конструировании вентиляционной системы следует стремиться к тому, чтобы при движении воздуха не было его завихрения. Нужно по возможности избегать внезапных изменений сечений воздухопровода, выступающих частей, рассекающих воздушный поток, и резких поворотов струй воздуха.

5-11. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ РАСЧЕТЫ

В машинах с радиальной вентиляцией принудительное движение воздуха осуществляется как с помощью ветрениц, располагаемых в радиальных каналах, так и с помощью лопаток, установленных на торцевых частях обмотки ротора (асинхронные машины), или ковшевидных лопаток, пристраиваемых на торцах ротора синхронной машины. В обычном вентиляционном расчете все эти устройства принимаются за некоторый эквивалентный цетробежный вентилятор, имеющий расчетную ширину лопатки, равную сумме вентилирующих крылышек или лопаток.

Для оценки вентиляции машины пользуются приближенным методом, позволяющим ориентировочно определить производительность вентилирующего устройства и оценить условия охлаждения проектируемой машины.

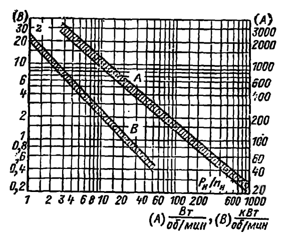


Рис. 5-20. Зависимость аэродинамического сопротивления Z, Па·с²/м⁶, вентиляционного канала.

Приближенный метод, основанный на данных заводского опыта, заключается в следующем. Из (5-91) определяется необходимый расход охлаждающего воздуха. Рассчитывается по эмпирической формуле количество воздуха, доставляемое вентиляционным устройством, м³/с,

$$V' = q_0 (n_к b_к + m) n_н D^2, \quad (5\text{-}133)$$

где q_0 и m — опытные коэффициенты, для машин постоянного тока $q_0=31{,}5\cdot10^{-3}$, $m=0{,}10$; для асинхронных машин $q_0=26\cdot10^{-3}$, $m=0{,}10$; для явнополюсных синхронных машин $m=\Sigma b_к$, $q_0=25\cdot10^{-3}$ при $l_1\leqslant0{,}5$ м, $q_0=(25\div22)\cdot10^{-3}$ при $0{,}5<l_1<1{,}0$ м, $q_0=(22\div18{,}7)\cdot10^{-3}$ при $1{,}0<l_1\leqslant1{,}50$ м;

$n_к$, $b_к$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов;

$\Sigma b_к$ — суммарная ширина ковшевидных лопаток;

$n_н$ — номинальная частота вращения, об/мин;

D — диаметр якоря или ротора.

Далее находится ориентировочное значение напора H, развиваемое

вентиляционным устройством ротора, Па,

$$H \approx 8n_{п}D^2. \quad (5\text{-}134)$$

Мощность, расходуемая на вентиляцию, кВт,

$$P_{в} \approx 0{,}175\left(\frac{u}{10}\right)^2 V', \quad (5\text{-}135)$$

где u — окружная скорость ротора или вентиляционных крыльев, м/с.

После указанных расчетов сопоставляются значения V' и V. Если $V' \geqslant V$, то вентиляционное устройство обеспечивает необходимые условия охлаждения. Если же $V' < V$, то вентиляционное устройство необходимо усилить, что обеспечивается добавлением вентиляционных лопаток, если они отсутствовали, или увеличением их размеров, или, наконец, установкой отдельного вентилятора.

В защищенных машинах с аксиальной вентиляцией во многих случаях можно ограничиться упрощенными вентиляционными расчетами. Из кривых рис. 5-20, полученных по данным испытаний и расчета большого количества электрических машин, берется ориентировочное значение аэродинамического сопротивления вентиляционной системы машины. Далее, определив необходимое количество охлаждающего воздуха $V_{в}$, находят соответствующий напор $H_{к}$, требуемый для вентилятора. Дальнейший расчет сводится к определению размеров вентилятора.

Глава шестая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ МАШИН

6-1. СЕРИИ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Первыми сериями асинхронных машин, созданными в 1920—1930 гг. были серии ДАО, ДАО-2, И (разработка и выпуск завода «Электросила») и серии Т и МТ (разработка и выпуск ХЭМЗ). Позднее были созданы серии асинхронных двигателей И2, АД, МА-200, АМ и ряд других.

Каждая из серий для своего времени была достаточно хорошо спроектирована и находилась на уровне передовых образцов мирового электромашиностроения. Однако обилие серий, охватывающих каждая лишь определенные и сравнительно узкие диапазоны мощностей и исполнений, создавало значительные трудности для наращивания их выпуска. Серии разрабатывались и производились различными электромашиностроительными заводами при недостаточной взаимной координации, поэтому конструкции двигателей близких мощностей и исполнений каждой из серий имели свои особенности. Это создавало большие трудности при производстве и особенно при замене и ремонте двигателей, так как двигатели разных серий одной и той же мощности и частоты вращения могли иметь разные присоединительные и установочные размеры, габариты, различную конструкцию корпуса и подшипниковых щитов и т. п.

Резко возрастающая энерговооруженность промышленности требовала большее число всевозможных модификаций двигателей, способных работать в различных специфических для данной отрасли условиях. Число таких модификаций в старых сериях было явно недостаточно.

Все это привело к необходимости создания единой для всей страны серии асинхронных машин, объединенных общими конструктивными решениями, общей технологией, с широкой унификацией различных узлов и деталей и основанной на единых шкалах мощностей, габаритных, присоединительных и установочных размеров.

В 1946—1949 гг. была создана первая в мировой практике единая серия асинхронных двигателей общего назначения, отвечающая этим требованиям. Эта серия, заменившая восемь существовавших ранее, была названа единой серией А. Она

охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт. Двигатели имели два основных исполнения по способу защиты от воздействия окружающей среды: защищенное (обозначение А) и закрытое обдуваемое (обозначение АО).

Развитие электромашиностроения, появление новых электроизоляционных материалов и успехи в изучении электромагнитных и тепловых процессов в электрических машинах позволили в 1957—1959 гг. создать новую единую серию асинхронных двигателей того же диапазона мощностей — серию **А2**, значительно превосходящую первую серию А по своим технико-экономическим и массогабаритным показателям. Эта серия также имела два основных исполнения: защищенное А2 и закрытое обдуваемое АО2.

Внедрение в производство двигателей серии А2—АО2 завершилось лишь к концу 60-х годов. Основная масса асинхронных двигателей, установленных на предприятиях в настоящее время, является двигателями этой серии. Многие типоразмеры серии выпускаются рядом заводов еще и сейчас.

Асинхронные вдигатели мощностью от 100 до 1000 кВт также длительное время выпускались разрозненными сериями (серии АМ, МА, ДАМСО, ФАМСО и др.). В 1952—1956 гг. была разработана единая серия двигателей такого диапазона мощностей, названная серией А—АК (асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами). В дальнейшем эта серия подвергалась существенной переработке. Были применены новые электроизоляционные материалы и повышен уровень использования активной части двигателей. В закрытых обдуваемых двигателях принят новый принцип охлаждения ротора — продув ротора наружным воздухом. В последующие годы модериизированные отрезки этой серии получили наименование серии А3.

Серия 4А была спроектирована в 1969—1971 гг. и в настоящее время внедрена в производство. Она базируется на рекомендациях МЭК по шкале мощностей и установочных размеров и на рекомендациях СЭВ по увязке мощностей и установочных размеров. В результате использования новых электроизоляционных материалов, позволивших в большинстве типоразмеров серии 4А применить изоляцию класса нагревостойкости F, и детальной конструкторской и технологической разработки двигатели этой серии по своим технико-экономическим показателям не уступают лучшим зарубежным образцам, а по ряду показателей превосходят их.

В основу построения серии положены не габаритные диаметры сердечников статора, как в прежних сериях, а высоты оси вращения h, т. е. расстояния от оси вращения ротора до установочной поверхности.

Таблица 6-1

Увязка мощностей с высотой оси вращения для низковольтных асинхронных двигателей (серия 4А) исполнения IP44

Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт, при числе полюсов $2p$					
		2	4	6	8	10	12
56	—	0,18; 0,25	0,12; 0,18	—	—	—	—
63	—	0,37; 0,55	0,25; 0,37	0,18; 0,25	—	—	—
71	—	0,75; 1,1	0,55; 0,75	0,37 0,55	0,25	—	—
80	—	1,5; 2,2	1,1; 1,5	0,75 1,1	0,37; 0,55	—	—
90	L	3,0	2,2	1,5	0,75; 1,1	—	—
100	S	4,0	3,0	—	—	—	—
	L	5,5	4,0	2,2	1,5	—	—
112	M	7,5	5,5	3,0; 4,0	2,2; 3,0	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4,0	—	—
	M	11	11	7,5	5,5	—	—
160	S	15	15	11	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	—
180	S	22	22	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—
200	M	37	37	22	18,5	—	—
	L	45	45	30	22	—	—
225	M	55	55	37	30	—	—
250	S	75	75	45	37	—	—
	M	90	90	55	45	—	—
280	S	110	110	75	55	—	—
	M	132	132	90	75	—	—
315	S	160	160	110	90	55	45
	M	200	200	132	110	75	55
355	S	250	250	160	132	90	75
	M	315	315	200	160	110	90

Таблица 6-2

Увязка мощностей с высотой оси вращения для низковольтных асинхронных двигателей (серия 4А) исполнения IP23

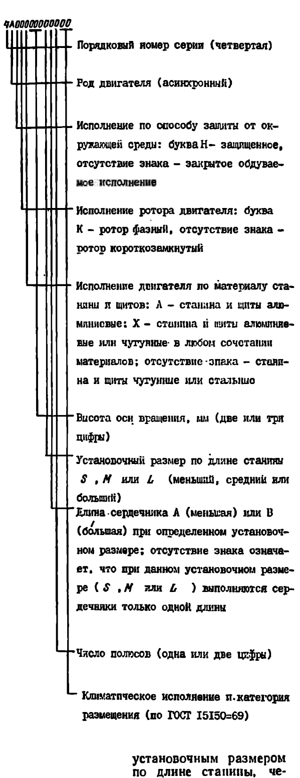
Высота оси вращения h, мм	Обозначение длины	Мощность двигателей, кВт, при числе полюсов $2p$					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22	18,5	11	7,5	—	—
	M	30	22	15	11	—	—
180	S	37	30	18,5	15	—	—
	M	45	37	22	18,5	—	—
200	M	55	45	30	22	—	—
	L	75	55	37	30	—	—
225	M	90	75	45	37	—	—
250	S	110	90	55	45	—	—
	M	132	110	75	55	—	—
280	S	160	132	90	75	—	—
	M	200	160	110	90	—	—
315	S	—	200	132	110	75	55
	M	250	250	160	132	90	75
355	S	315	315	200	160	110	90
	M	400	400	250	200	132	110

В табл. 6-1—6-4 приведены данные по увязке мощностей с высотой оси вращения асинхронных двигателей, выпускаемых нашей промышленностью в настоящее время.

Серия 4А охватывает диапазон мощностей от 0,06 до 400 кВт и выполнена на 17 стандартных высотах оси вращения (шкала высот оси вращения приведена в табл. П-39). На каждой из высот, кроме $h=225$ мм, выпускаются двигатели двух разных длин, различные по мощности. С высотой оси вращения $h=225$ мм выпускают двигатели только одной длины. Таким образом, шкала мощностей серии содержит 33 ступени.

Коэффициент нарастания мощностей меняется от 1,5—1,4 у двигателей с высотами оси вращения $h=50 \div 80$ мм до 1,25—1,2 у двигателей с $h=280 \div 355$ мм.

В серии приняты следующие обозначения двигателей:



Примеры обозначения двигателей

4А180М4У3 — асинхронный двигатель 4-й серии, закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и щитами, высотой оси вращения $h=180$ мм, средним (М) установочным размером по длине станины, четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3

4АН315S10У3 — асинхронный двигатель 4-й серии защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором, стальными станиной и щитами, высотой оси вращения 315 мм, со средним (S) установочным размером, десятиполюсный, климатического исполнения У и категории размещения 3

Таблица 6-3

Увязка мощностей с высотой оси вращения для асинхронных двигателей серии А3 низкого напряжения мощностью свыше 100 кВт

Высота оси вращения *h*, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт											
		Степень защиты IP23						Степень защиты IP44					
		Ротор короткозамкнутый	Ротор короткозамкнутый и фазный					Ротор короткозамкнутый					
		2 p=2	4	6	8	10	12	2	4	6	8	10	12
315	S	160	132; 160	110	90	55	45	132	132	90	75	45	37
	M	200	200	132	110	75	55	160	160	110	90	55	45
355	S	250	250	160	132	90	75	200	200	132	110	75	55
	M	315	315	200	160	110	90	250	250	160	132	90	75
400	S	400	400	250	200	132	110	315	315	200	160	110	90
	M	500	500	315	250	160	132	400	400	250	200	132	110

Таблица 6-4

Увязка мощностей с высотой оси вращения для асинхронных двигателей на 6000 В

Высота оси вращения *h*, мм	Обозначение длины	Мощность, кВт									
		Степень защиты IP23					Степень защиты IP44				
		Ротор короткозамкнутый и фазный					Ротор короткозамкнутый и фазный				
		2 p=4	6	8	10	12	4	6	8	10	12
400	S	200	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	250	200	—	—	—	—	—	—	—	—
	L	315	250	200	—	—	—	—	—	—	—
450	S	400	315	250	200	—	—	—	—	—	—
	M	500	400	315	250	—	200	—	—	—	—
	L	—	—	—	—	—	250	200	—	—	—
500	S	630	500	400	315	200; 250	—	—	—	—	—
	M	800	630	500	400	315	315	250	200	—	
	L	—	—	—	—	—	400	315	250	200	—
560	S	1000	800	630	500	400	—	—	—	—	—
	M	1250	1000	800	630	500	500	400	315	250	200
	L	—	—	—	—	—	630	500	400	315	250
630	S	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	—	—	—	—	—	800	630	500	400	315
	L	—	—	—	—	—	1000	800	630	500	400

4АНК315S10У3 — то же, что в предыдущем примере, но двигатель с фазным ротором

4А315S10У3 — то же, что и ранее, но двигатель закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором

Основными исполнениями являются закрытое обдуваемое (4А) и защищенное (4АН). Закрытые обдуваемые двигатели выпускаются во всем диапазоне высот оси вращения от 50 до 355 мм; двигатели защищенного исполнения — в диапазоне высот от 160 до 355 мм. Новые конструктивные решения ряда узлов позволили в двигателях этой серии несколько увеличить объем активной части за счет увеличения наружного диаметра сердечника статора при той же высоте оси вращения по сравнению с двигате-

Таблица 6-5

Группы конструктивного исполнения асинхронных двигателей серии 4А и способы защиты от воздействия окружающей среды

Степень защиты двигателей от воздействия окружающей среды (по ГОСТ 17494-72	Высоты оси вращения, мм	Группы конструктивного исполнения двигателей по СТ СЭВ 246-76 (см. § 1-4)
IP23	160—355	IM1*
IP44	50—250 280 315—355	IM1, IM2, IM3 IM1*, IM2*, IM3** IM1*, IM2*

* По способу монтажа только с горизонтальным расположением вала.

** По способу монтажа только с вертикальным расположением вала.

лями предыдущих серий. В то же время применение изоляции класса нагревостойкости F и новых сортов электротехнической стали (серия рассчитана на стали 2013 и 2312) дало возможность повысить электромагнитные нагрузки. Это позволило увеличить мощность двигателей при тех же высотах оси вращения, что и в прежних сериях, и улучшить их технико-экономические показатели.

Двигатели выполняются на следующие номинальные напряжения: 220/380 В — при мощностях от 0,06 до 0,37 кВт, 220/380 и 380/660 В — при мощностях от 0,55 до 110 кВт, 380/660 В — при мощностях более 132 кВт. Исполнение двигателей по степени защиты от воздействия окружающей среды и способу монтажа в зависимости от высоты оси вращения соответствует указанным в табл. 6-5.

Большой диапазон мощностей, охватываемых серией, и два основных исполнения обусловили различную конструкцию отдельных узлов двигателей в зависимости от мощности.

Двигатели с высотами оси вращения 50 и 63 мм (мощность 0,06—0,37 кВт) выполняются с литыми алюминиевыми станинами и подшипниковыми щитами. Более мощные двигатели выполняются с литыми чугунными станиной и щитами, а двигатели 4АН с $h \geqslant 280$ мм (мощностью 132 кВт и больше) — со сварной стальной станиной и литыми чугунными щитами. Имеются также различия в конструкции крепления сердечников статора и ротора, подшипниковых узлов, обмотки и т. п.

В статорах всех двигателей с $h \leqslant 160$ мм выполняют однослойную обмотку. В остальных двигателях всей серии обмотки двухслойные.

Во всех двигателях с $h \leqslant 250$ мм и в двигателях с $2p \geqslant 10$ при $h \geqslant 280$ мм обмотка статора выполняется из круглого обмоточного провода. В двигателях $h \geqslant 280$ мм при $2p \leqslant 8$ обмотка полужесткая из прямоугольного провода, укладываемая в полуоткрытые пазы.

6-2. КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

Отрезок серии двигателей с короткозамкнутым ротором закрытого обдуваемого исполнения с высотами оси вращения от 160 до 250 мм охватывает диапазон мощностей от 15 до 90 кВт (в четырехполюсном исполнении). На рис. 6-1 показана конструкция одной из таких машин. Станина *1* и торцевые щиты *2* отлиты из чугуна. Наружный вентилятор *3* крепится на выступающем конце вала *4*, противоположном выводному. Вентилятор закрыт кожухом из листовой стали *5*. Наружный воздух засасывается вентилятором через жалюзи кожуха и прогоняется вдоль ребер станины. На станине укреплена коробка выводов *6*. При установке она может быть повернута в удобном для подводки питающего кабеля направлении.

Внизу станины ребра расположены более редко и укорочены по сравнению с другими, что дает возможность несколько уменьшить высоту оси вращения. Сердечник статора *7* выполнен из листов электротехнической стали 2013 и после опрессовки скреплен скобами *8*. Сердечник закреплен в станине стопорными винтами *9*, предохраняющими его от проворачивания при резких толчках нагрузки. Пазы сердечника — полузакрытые. Обмотка *10*—

всыпная из круглого обмоточного провода марки ПЭТ-155 или ПЭТ-155М, применяемого при машинной намотке. Сердечник ротора 11 выполняется из той же стали, что

Сердечник ротора в машинах с высотой оси вращения $h \leqslant 250$ мм крепится на валу горячей посадкой. При больших h для крепления применяют шпонки. Вал ротора выпол-

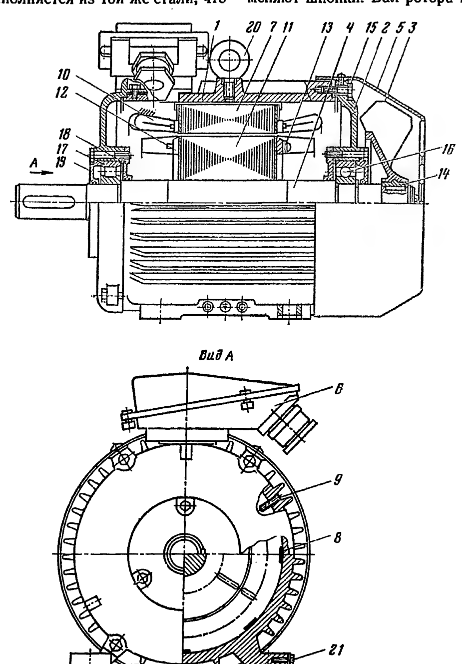


Рис. 6-1. Конструкция асинхронного двигателя серии 4А со степенью защиты IP44, $h=160$ мм.

и статор, опрессовывается и в спрессованном состоянии заливается алюминием. Одновременно с заливкой пазов отливаются замыкающие кольца *12* и вентиляционные лопатки. На замыкающих кольцах с обоих торцов ротора при балансировке крепятся балансировочные грузы *13*.

нен из стали 45. Вентилятор — литой из алюминия. При отливке вентилятора в него устанавливается стальная втулка *14*, которая служит для крепления вентилятора на валу.

Подшипниковые щиты крепятся к станине при помощи болтов *15*. В центре щита имеются отверстия,

расточенные под посадку наружных обойм подшипников *16* и *17*. Точность положения оси ротора относительно внутренней поверхности станины обеспечивается обработкой поверхностей посадки подшипниковых щитов на станину и наружных обойм подшипников при одной установке щитов на станке, а поверхностей станины под посадку щитов и сердечника статора при одной установке станины на расточном станке. Каждый из подшипников закрыт с обеих сторон подшипниковыми крышками *18* и *19*, препятствующими вытеканию смазки при работе машины. Подшипниковые крышки имеют развитые поверхности прилегания к валу с лабиринтными уплотнениями.

В двигателях меньшей мощности устанавливаются два шариковых подшипника. При большей мощности со стороны выводного конца устанавливают роликовый подшипник, а с противоположной стороны — шариковый.

Станина крепится к фундаменту с помощью лап, имеющих отверстия под крепежные болты. Лапы отлиты за одно целое со станиной. Сверху станина имеет прилив с резьбовым отверстием, в которое ввинчивается рым-болт *20* для подъема двигателя при монтаже.

На лапах выполнены отверстия с резьбой, в которые ввинчиваются болты *21* для подсоединения шин заземления.

Пазы роторов двигателей отрезка серии с высотой оси вращения 160—250 мм — закрытые грушевидные, а в двухполюсных двигателях с h=250 мм — закрытые лопаточные.

Двигатели защищенного исполнения этого отрезка серии (рис. 6-2) отличаются от рассмотренных выше конструкцией станины *1*, подшипниковых щитов *2* и наличием диффузоров *3*. Наружный вентилятор в них отсутствует. Охлаждающий воздух под действием вентиляционных лопаток на замыкающих кольцах ротора засасывается в жалюзи *4*, расположенные на подшипниковых щитах, омывает лобовые части обмотки *5* и ярмо сердечника статора *6* и выбрасывается в выходные отверстия станины *7*. Диффузоры служат для разделения областей с пониженным давлением (перед вентиляционными лопатками) и с повышенным давлением (выше вентиляционных лопаток).

Двигатели отрезка серии с высотами оси вращения 280, 315 и 355 мм имеют существенные конструктивные отличия от рассмотренных выше.

На рис. 6-3 показана конструкция короткозамкнутого двигателя в закрытом обдуваемом исполнении. Такие двигатели в указанном диапазоне осей вращения выполняются в четырехполюсном исполнении мощностью от 110 до 315 кВт. Сердечник статора *1* шихтуется и опрессовывается непосредственно в станине между двумя нажимными шайбами *2*, после чего закрепляется кольцевыми шпонками *3*. Усилие от нажимных шайб передается на листы сердечника через нажимные пальцы *4*, чем достигается равномерное распределение давления на всю торцевую поверхность, включая зубцы сердечника.

Обмотка статора *5* этих двигателей выполнена из прямоугольного провода и укладывается в полуоткрытые пазы (см. рис. 3-9, *б*). Лобовые части обмотки закреплены с помощью дистанционных прокладок и бандажных колец *6*.

Наиболее интересной в рассматриваемых двигателях является конструкция ротора *7*, которая была разработана и запатентована при проектировании этих машин. Ротор выполнен продувным, т. е. по его аксиальным каналам проходит наружный воздух, обеспечивая значительно более интенсивное охлаждение, чем в машинах обычных исполнений. Для того чтобы воздух не проникал к обмоткам машины, т. е. для выполнения условий, налагаемых принятым исполнением IP44 с точки зрения защиты от воздействия окружающей среды, в аксиальные отверстия ротора вставлены трубки *8*, вторые концы которых закреплены в отверстиях дисков *9*, насаженных на вал ротора *10*. Наружный воздух прогоняется через аксиальные каналы ротора тем же вентиля-

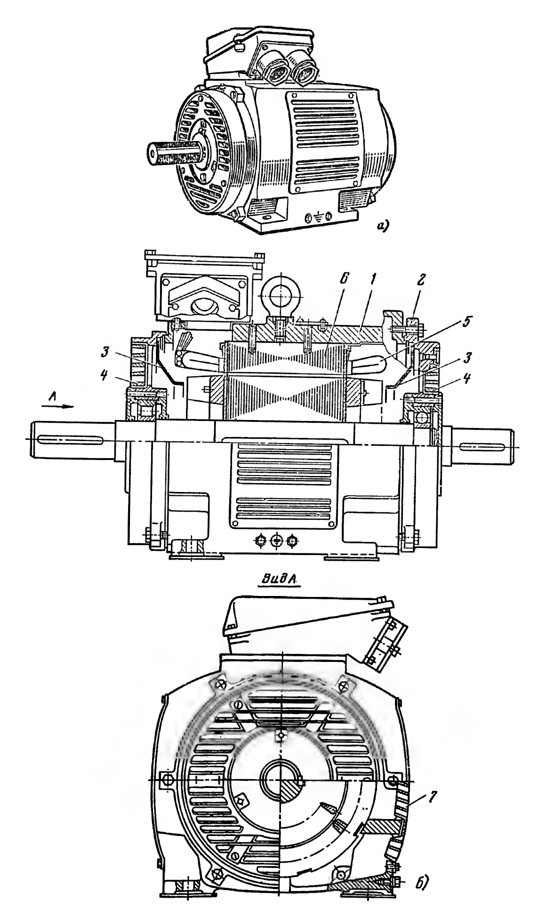


Рис. 6-2. Асинхронный двигатель серии 4А со степенью защиты IP23, $h=180$ мм.
а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы.

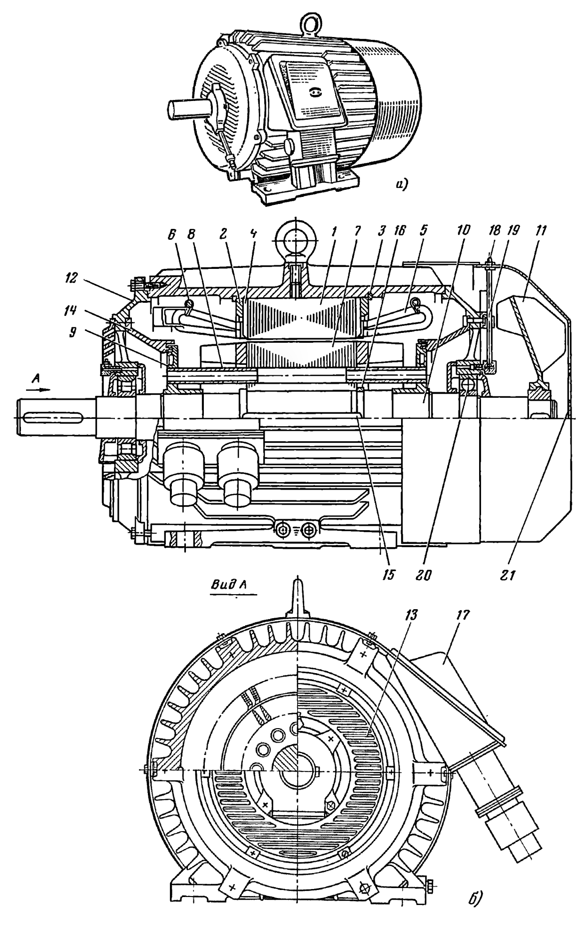


Рис. 6-3. Асинхронный двигатель серии 4А со степенью защиты IP44 (с продуваемым ротором), $h=315$ мм.

а — общий вид двигателя; *б* — продольный и поперечный разрезы двигателя.

тором *11*, который служит и для обдува наружной поверхности двигателя. Торцевые щиты *12* имеют жалюзи *13* для прохода воздуха к трубкам и выхода его наружу. Для предотвращения возможности проникновения наружного воздуха, продуваемого через ротор, внутрь машины предусмотрены направляющие кольца *14*, на поверхности соприкосновения которых с вращающимися дисками *9* выполнены уплотнения.

Сердечник ротора крепится на валу с помощью шпонки *15*. Место посадки сердечника на вал фиксируется буртиком вала и упорным кольцом *16*.

Коробка выводов *17* расположена сбоку станины. Масленка *18*, соединенная трубой маслопровода *19* с подшипниковым узлом, позволяет производить смазку подшипника *20*, не снимая кожуха *21* наружного вентилятора.

В остальном конструкция закрытых обдуваемых двигателей второго отрезка серии не существенно отличается от рассмотренной выше конструкции двигателя меньшей мощности такого же исполнения (см. рис. 6-1).

Двигатели защищенного исполнения с короткозамкнутыми и фазными роторами с высотами оси вращения 280—355 мм по конструкции корпуса отличны от описанных выше двигателей.

На рис. 6-4, 6-5 показаны двигатели соответственно с короткозамкнутым и фазным роторами (номера позиции на рисунках одинаковые).

Жесткая, сварная из стального проката станина *1* охватывает только нижнюю половину сердечника статора *2*, который крепится в ней с помощью массивных нажимных колец *3*. Корпус *4* выполнен из листовой стали. Подшипниковые щиты *5* также крепятся к станине только нижней половиной. Подшипники *6* и *7* заключены в капсулы, монтируются с крышками *8* и *9* до сборки двигателя и в собранном виде устанавливаются в подшипниковые щиты.

Охлаждающий воздух засасывается в двигатель через жалюзи *10* на торцевых щитах, направляется диффузорами *11* на вентиляционные лопатки *12* ротора *13*, омывает лобовые части обмотки *14* и сердечник статора и выбрасывается в жалюзи на боковых сторонах корпуса.

Отказ от цельной станины существенно уменьшил общую массу двигателей, а выполнение корпуса в виде параллелограмма вместо традиционной для электрических машин цилиндрической формы позволил улучшить условия охлаждения двигателей без увеличения их габаритных размеров.

Обмотка статора у всех двигателей этого отрезка серии, кроме машин с $2p=10$ и 12, выполнена из прямоугольного провода и укладывается в полуоткрытые пазы (см. рис. 3-9, *б*). Лобовые части катушек прочно закрепляют, привязывая их к бандажным кольцам *15*. В многополюсных машинах обмотка статора выполняется всыпной из круглого провода и укладывается в полузакрытые пазы.

В короткозамкнутых роторах двигателей с $h \geqslant 280$ мм выполняют закрытые пазы (при $2p \geqslant 4$ — трапецеидальные, сужающиеся к верхней части, см. рис. 3-8, *е*; при $2p=2$ — лопаточные, см. рис. 3-8, *з*).

В фазных роторах (рис. 6-5) при прямоугольных с малым раскрытием пазах выполняют стержневую волновую обмотку. Выводные концы обмотки ротора *16* проходят к контактным кольцам *17* через внутреннее отверстие в конце вала ротора. Контактные кольца располагаются на пластмассовой втулке *18*, которая консольно крепится к торцу вала. Весь щеточный узел закрыт кожухом *19*, на котором расположена коробка зажимов *20* для соединения щеток с пусковым реостатом.

Потребность народного хозяйства в асинхронных двигателях мощностью 500—1000 кВт и более значительно меньше, чем в двигателях до 100 кВт. Крупные двигатели, как правило, предназначены для приводов определенного типа силовых агрегатов и имеют значительно более узкое назначение, чем двигатели малой и средней мощности. Они выпускаются отдельными сравнительно

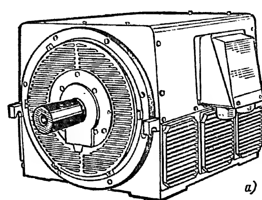


Рис. 6-4. Асинхронный двигатель серии 4А со степенью защиты IP23 с короткозамкнутым ротором (4АН315М4У3), $h=315$ мм.

а — общий вид; *б* — продольный и поперечный разрезы.

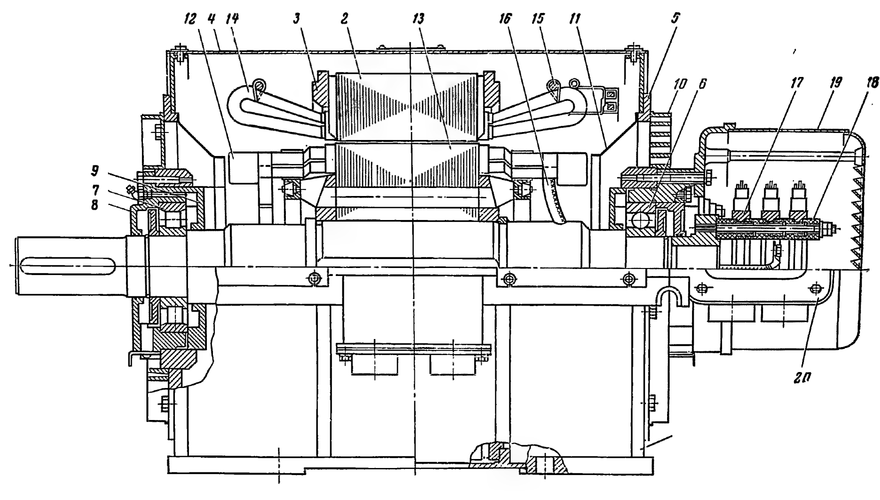


Рис. 6-5. Конструкция асинхронного двигателя серии 4А со степенью защиты IP23 с фазным ротором (4АНК355М4У3). h=355 мм.

небольшими сериями, значительно отличаются друг от друга конструкцией и характеристиками. К таким сериям относится, например, серия АТД, охватывающая диапазон мощностей от 500 до 2750 кВт в двухполюсном исполнении двигателей. Двигатели этой серии (рис. 6-6) выполняются в основном на высокое

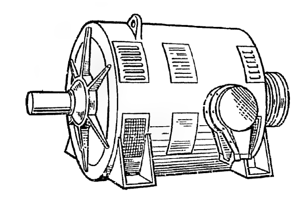


Рис. 6-6. Асинхронный двигатель серии АДТ мощностью 1250 кВт, $2p=2$, $U=6000$ В.

номинальное напряжение, равное 6000 и 10 000 В, однако двигатели меньшей мощности (500—800 кВт) выпускаются также и на напряжение 380/660 В.

Для тихоходных приводов с тяжелыми условиями пуска, а также для приводов, требующих регулирования частоты вращения, применяют двигатели серии АН-2. В серию входят крупные многополюсные асинхронные двигатели мощностью от 315 до 2000 кВт при частоте вращения от 250 до 1000 об/мин. Они имеют два основных исполнения: с фазными роторами — АКН-2 и с короткозамкнутыми роторами — АН-2. Двигатели этой серии используются в приводах шахтных подъемов (двигатели с фазными роторами), угольных и цементных шаровых мельниц, мощных дымососов и т. п.

6-3. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ВЫБОР БАЗОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины, указания о режиме ее работы, конструктивной форме исполнения, степени защиты от воздействия окружающей среды, системе охлаждения. Помимо этого могут быть заданы также дополнительные требования к проектируемому двигателю, например наименьшие допустимые значения кратности максимального и минимального моментов, а для двигателей с короткозамкнутыми роторами также предельные значения пускового тока и наименьшие значения пусковых моментов. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТ.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве базовой модели следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А предусмотренного в техническом задании исполнения.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть большим, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку, узкие и глубокие пазы и т. п.

Требования к пусковым характеристикам машин с короткозамкнутым ротором следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большое увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но од-

новременно при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету.

6-4. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины воздушного зазора l_δ. Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной:

$$\frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta}. \quad (6\text{-}1)$$

В начальный период расчета двигателя все величины, входящие в (6-1), кроме синхронной угловой скорости, неизвестны. Поэтому расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (α_δ, k_B и $k_{об}$), и приближенно определяют расчетную мощность P'. Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является отношение l_δ/D или более употребительное в расчетной практике отношение $\lambda = l_\delta/\tau$. Это отношение в значительной степени определяет экономические данные машин, а также оказывает влияние на характеристики и условия охлаждения двигателей.

Анализ показывает, что у большинства выполненных асинхронных двигателей общего назначения отношение λ изменяется в достаточно узких пределах. Поэтому для определения D и l_δ можно предварительно выбрать то или иное отношение λ, характерное для заданного исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры, исходя из (6-1). Однако внутренний диаметр статора непосредственно связан определенными размерными соотношениями с наружным диаметром статора D_a, в свою очередь определяющим высоту оси вращения h, значение которой при проектировании новых двигателей может быть принято только из стандартного ряда высот, установленных ГОСТ.

Наружный диаметр статора должен также соответствовать определенным условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке. С учетом этих требований при ручном расчете асинхронного двигателя более целесообразным является выбор главных размеров, основанный на предварительном определении высоты оси вращения и увязке этого размера с наружным диаметром статора и последующем расчете внутреннего диаметра статора D.

В связи с этим выбор главных размеров проводят в следующей последовательности.

Высоту оси вращения предварительно определяют по рис. 6-7, *а* или *б* для заданных P_2 и $2p$ в зависимости от исполнения двигателя.

Из ряда высот осей вращения (табл. 6-6) берут ближайшее к предварительно найденному меньшее стандартное значение h. Следует иметь в виду, что ГОСТ 13267-73 определяет стандартные высоты осей вращения независимо от назначения и конструктивного исполнения асинхронных двигателей, поэтому высота оси вращения любого проектируемого двигателя должна быть равна одному из этих значений.

Наружный диаметр статора D_a берут из второй строки табл. 6-6 в

Таблица 6-6

Высоты оси вращения электрических машин (по ГОСТ 13267-73) и соответствующие им наружные диаметры статоров асинхронных двигателей серии 4А

h, мм	56	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
D_a, м	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,530	0,590	0,660

Рис. 6-7. Высота оси вращения h двигателей серии 4А различной мощности и частоты вращения.

а — со степенью защиты IP44; *б* — с IP23.

зависимости от выбранной высоты оси вращения.

Приведенные в таблице наружные диаметры статоров для каждой из h нормализированы и соответствуют данным серии асинхронных машин 4А. В процессе проектирования новых машин они могут быть изменены, однако при выбранном значении h изменение D_a в меньшую сторону нецелесообразно, так как при этом возрастут электромагнитные нагрузки. Увеличение D_a при той же h требует тщательной конструкторской и технологической проработки, доказывающей возможность такого изменения.

Внутренний диаметр статора D в общем случае может быть определен по наружному диаметру, высотам ярма и зубцов статора:

$$D = D_a - 2(h_a + h_z).$$

На данном этапе расчета размеры h_a и h_z неизвестны. Поэтому для определения D используют эмпирические зависимости, основанные на следующем.

При одном и том же уровне индукции на участках магнитопровода в машинах с одинаковым D высота ярма статора будет пропорциональна потоку, а следовательно, обратно пропорциональна числу

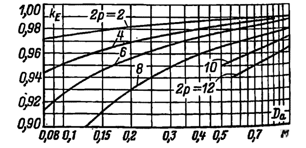


Рис. 6-8. Значения коэффициента k_E.

полюсов машины (прямо пропорциональна полюсному делению). Принимая, что размеры пазов не зависят от числа полюсов машины, получаем приближенное выражение

$$D = K_D D_a. \qquad (6\text{-}2)$$

Значения коэффициентов K_D, приведенные в табл. 6-7, характеризуют отношения внутренних и наружных диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей серии 4А при различных числах полюсов и могут быть использованы для предварительного определения D вновь проектируемой машины.

Таблица 6-7

Отношение $K_D = D/D_a$ в двигателях серии 4А при различных числах полюсов

$2p$	2	4	6	8—12
K_D	0,52—0,57	0,64—0,68	0,70—0,72	0,74—0,77

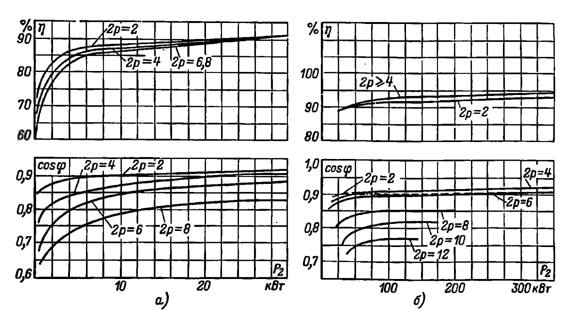


Рис. 6-9. Примерные значения КПД и cos φ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44.

а — двигателей мощностью до 30 кВт; *б* — двигателей мощностью до 400 кВт.

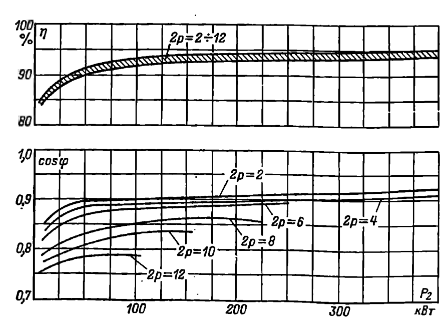


Рис. 6-10. Примерные значения КПД и cos φ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP23.

Далее находят полюсное деление τ, м,

$$\tau = \pi D/2p. \qquad (6\text{-}3)$$

и расчетную мощность P', Вт,

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi}, \qquad (6\text{-}4)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт;

k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 6-8.

Предварительные значения η и $\cos \varphi$, если они не указаны в задании на проектирование, находятся по ГОСТ. Приближенные значения η и $\cos \varphi$ могут быть взяты по кривым рис. 6-9 и 6-10, построенным по данным двигателей серии 4А.

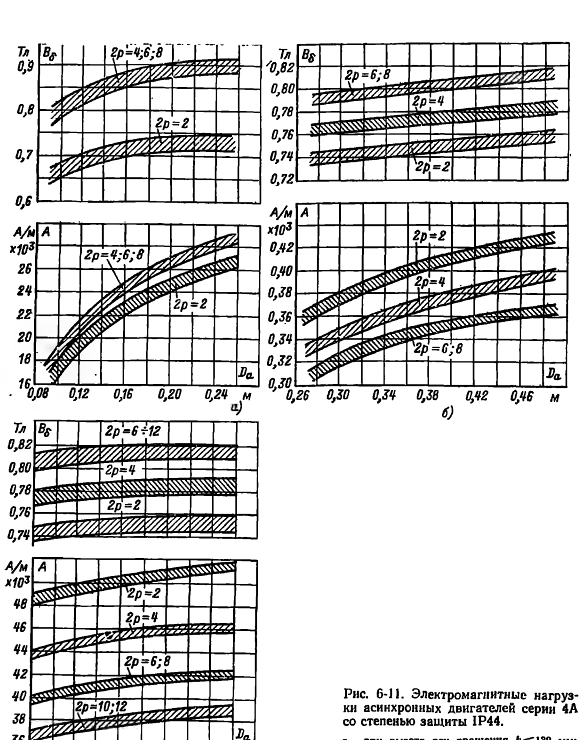


Рис. 6-11. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44.

а — при высоте оси вращения $h \leqslant 132$ мм; *б* — при $h = 160 \div 250$ мм; *в* — при $h \geqslant 280$ мм с продуваемым ротором.

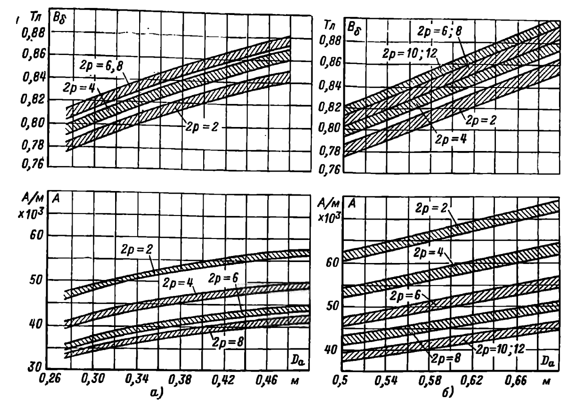


Рис. 6-12. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP23.

а — при высоте оси вращения h=160÷250 мм; *б* — при $h \geqslant 280$ мм.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A, А/м, и B_δ, Тл, должен быть проведен особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины.

При этом если главные размеры машины зависят от произведения AB_δ [см. (6-1)], то на характеристики двигателя оказывает существенно влияние также и соотношение между этими величинами. Рекомендации по выбору A и B_δ, представленные в виде кривых на рис. 6-11—6-13 для машин различной мощности и исполнения, основаны на данных изготовленных двигателей [12], характеристики которых удовлетворяют требованиям ГОСТ. На каждом из рисунков даются области их допустимых значений. При выборе конкретных значений A и B_δ в пределах рекомендуемой области следует, руководствуясь приведенными выше замечаниями, учитывать требования технического задания к характеристикам проектируемого двигателя.

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля k_B в асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены только после расчета магнитной цепи. Поэтому до расчета магнитной цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи. Основываясь на этом, значения коэффициентов предварительно принимают равными:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0,64; \quad k_B = \pi/2\sqrt{2} = 1,11.$$

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ выбирают в зависимости от типа обмотки статора. Для однослойных обмоток $k_{об1}$=0,95÷0,96. Для двухслойных и одно-двухслойных обмоток при $2p$=2 следует принимать $k_{об1}$=0,90÷0,91 и при большей полюсности $k_{об1}$=0,91÷0,92.

Синхронная угловая скорость вала двигателя Ω, рад/с, рассчитывается по формуле

$$\Omega = 2\pi \frac{n_1}{60} \text{ или } \Omega = 2\pi \frac{f_1}{p}, \quad (6\text{-}5)$$

где n_1 — синхронная частота вращения, об/мин;

f_1 — частота питания, Гц.

Из (6-1) с учетом значения α_δ расчетная длина воздушного зазора, м,

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{об1} A B_\delta}. \quad (6\text{-}6)$$

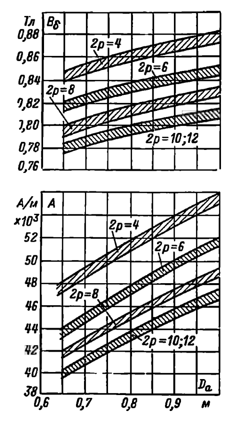


Рис. 6-13. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей высокого напряжения со степенью защиты IP23 при U=6000 В.

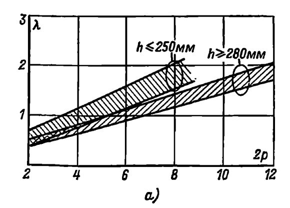
Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ служит отношение $\lambda = l_\delta/\tau$, которое должно находиться в пределах, показанных на рис. 6-14 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного ряда большей высоты оси вращения h. Если λ слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном ряду меньшей высоты h.

На этом выбор главных размеров заканчивается. В результате проделанных вычислений получены значения высоты оси вращения h, внутреннего диаметра статора D, наружного диаметра статора D_a, расчетной длины воздушного зазора l_δ и полюсного деления τ.

Для расчета магнитной цепи помимо l_δ необходимо определить полную конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1 и $l_{ст1}$) и ротора (l_2 и $l_{ст2}$). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250—300 мм, радиальных вентиляционных каналов не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{ст1} = l_\delta \ldots \quad (6\text{-}7)$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты, разделенные между собой радиальными вентиляционными



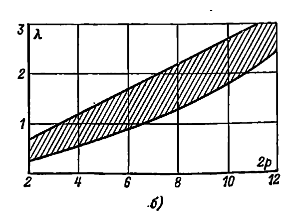


Рис. 6-14. Отношение $\lambda = l_\delta/\tau$ у двигателей серии 4А.

а — со степенью защиты IP44; б — с IP23.

каналами. В двигателях с фазными роторами или со сварной короткозамкнутой обмоткой пакеты выполняют длиной 40—60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов по технологическим соображениям из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

Стандартная ширина радиального воздушного канала между пакетами $b_к=10$ мм. Число пакетов $n_{пак}$ и их длина $l_{пак}$ связаны с расчетной длиной следующим соотношением:

$$n_{пак}=\frac{l_{ст}}{l_{пак}}\approx\frac{l_\delta}{l_{пак}}=\text{целое число.} \qquad (6\text{-}8)$$

При этом число радиальных каналов $n_к=n_{пак}-1$.

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{ст1}=l_{пак}n_{пак} \qquad (6\text{-}9)$$

или при пакетах разной длины

$$l_{ст1}=\Sigma l_{пак}. \qquad (6\text{-}10)$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1=l_{ст1}+b_к n_к. \qquad (6\text{-}11)$$

Окончательное значение l_δ для машин с $\delta<1{,}5$ мм

$$l_\delta\approx l_{ст1}. \qquad (6\text{-}12)$$

В машинах с $\delta\geqslant1{,}5$ мм при расчете l_δ учитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами (см. § 4-1):

$$l_\delta\approx l_1-b'_к n_к, \qquad (6\text{-}13)$$

где $b'_к$ — расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и $b_к$. Значение $b'_к$ при $b_к=10$ мм определяется по табл. 6-8

Таблица 6-8

Расчетная ширина радиальных каналов $b'_к$ при $b_к=10$ мм

δ, мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0
$b'_к$, мм	7,3	7,1	7,0	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

либо из выражения

$$b'_к=\gamma'\delta, \qquad (6\text{-}14)$$

где

$$\gamma'=\frac{2(b_к/\delta)^2}{5+2(b_к/\delta)}.$$

Для того чтобы полученная по (6-13) длина l_δ как можно ближе приближалась к ее значению, полученному ранее, проводят некоторую корректировку размера $l_{пак}$ и числа пакетов $n_{пак}$.

Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с $h<250$ мм берут равной длине сердечника статора, т. е. $l_2=l_1$. В двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора за счет увеличения длины его крайних пакетов на 5 мм и в крупных машинах высокого напряжения — на 10 мм.

Длина стали сердечника ротора

$$l_{ст2}=\Sigma l_{пак2}=l_2-n_к b_к \;\ldots(6\text{-}15)$$

Следующий этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков в фазе обмотки статора w_1. При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Чтобы выполнить эти условия, вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_1 в зависимости от типа обмотки, номинального на-

пряжения и полюсного деления машины. Для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, следовательно, малые зубцовые деления. В то же время ширина паза, составляющая примерно половину зубцового деления, не должна быть слишком малой, так как в этом случае ухудшается заполнение паза медью

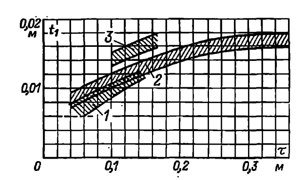


Рис. 6-15. Зубцовое деление статора асинхронных двигателей со всыпной обмоткой.

обмотки, а в машинах небольшой мощности может также недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов. Кроме того, надо иметь в виду, что стоимость машины с увеличением числа пазов возрастает, так как увеличиваются сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмоток.

Значения t_1 асинхронных двигателей серии 4А со всыпной обмоткой показаны на рис. 6-15, на котором зона *1* определяет возможные значения t_1 для небольших двигателей с высотой оси вращения $h \leqslant \leqslant 90$ мм; зона *2* определяет значения t_1 более крупных машин ($90 < < h \leqslant 250$ мм); зона *3* определяет значения t_1 многополюсных двигателей с $h \geqslant 280$ мм, выполняемых со всыпной обмоткой. Обычно двигатели с $h \geqslant 280$ мм имеют полужесткую обмотку, но в многополюсном исполнении при $2p \geqslant 10$ (в двигателях с $h=280$ и 315 мм) из-за малой высоты спинки статора размещение лобовых частей катушек из прямоугольного провода затруднено, поэтому такие машины выполняют со всыпной обмоткой, имеющей мягкие, легко поддающиеся формовке лобовые части.

Таблица 6-9

Зубцовое деление статора при прямоугольных пазах t_1, м

Полюсное деление τ, м	Напряжение, В		
	до 660	3000	6000
<0,15	0,016—0,020	0,022—0,025	0,024—0,030
0,15—0,4	0,017—0,022	0,024—0,027	0,026—0,034
>0,4	0,020—0,028	0,026—0,032	0,028—0,038

Для машин с полужесткой обмоткой из прямоугольного провода при $U_н \leqslant 660$ В и в высоковольтных машинах t_1 зависит от мощности и номинального напряжения и может быть взято в соответствии с данными табл. 6-9. В процессе расчета целесообразно не ограничиваться выбором какого-либо одного конкретного зубцового деления, а руководствуясь приведенными выше соображениями, рассмотреть диапазон возможных значений t_1 в пределах указанных значений зубцовых делений t_{1min}—t_{1max}. Тогда возможные числа пазов статора, соответствующие выбранному диапазону t_1,

$$Z_{1min} \div Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{1max}} \div \frac{\pi D}{t_{1min}}. \tag{6-16}$$

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q. Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q= =Z_1/2pm$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Лишь в многополюсных асинхронных двигателях иногда выполняют числа пазов, при которых q является дробным, причем большей частью со знаменателем дробности, равным двум, например $q=2^1/_2$ или $3^1/_2$. В отдельных случаях это правило может быть нарушено, однако необходимо иметь в виду, что обмотки с дробным q при сравнительно небольших числах пазов и полюсов,

характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Поэтому выбор окончательного числа пазов следует проводить с четкой увязкой и контролем получаемого при этом числа q. Окончательное значение $t_1=\pi D/2pmq$ не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10% и в любом случае для двигателей с $h\geqslant 56$ мм не должно быть менее 6—7 мм.

При определении числа эффективных проводников в пазу $u_п$ руководствуются следующим: $u_п$ должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным $u_п$ допускается лишь в исключительных случаях, так как это приводит к необходимости выполнять разновитковые катушки, что усложняет технологию изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа $u_п$ приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым (что особенно заметно при малых $u_п$), вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу $u'_п$ при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a=1$):

$$u'_п = \frac{\pi D A}{I_{1н} Z_1}, \qquad (6\text{-}17)$$

где A — принятое ранее значение линейной нагрузки, А/м; $I_{1н}$ — номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{1н} = \frac{P_2}{mU_н \eta \cos\varphi} \qquad (6\text{-}18)$$

(η и $\cos\varphi$ заданы или выбраны в начале расчета).

Полученное по (6-17) значение $u'_п$ не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a, при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_п = a u'_п. \qquad (6\text{-}19)$$

Число a при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов.

Полученное из (6-19) число $u_п$ округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвей a в дальнейшем, при выборе размеров и числа элементарных проводников, может быть изменено. В этом случае пропорционально меняется также и $u_п$.

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$w_1 = u_п Z_1/2am. \qquad (6\text{-}20)$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A = 2I_{1н} w_1 m/\pi D. \qquad (6\text{-}21)$$

Оно должно лишь незначительно отличаться от принятого ранее, так как его изменение определяется только отношением рассчитанного по (6-19) и принятого числа эффективных проводников в пазу $u_п$. Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым (см. рис. 6-11—6-13).

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы. Машины мощностью до 12—15 кВт в большинстве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку. В машинах большей мощности всыпные обмотки выполняются двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. Все обмотки из прямоугольного провода выполняются только двухслойными. Обмоточный коэффициент $k_{об}=k_р k_у$ рассчитывается в зависимости от принятого укорочения шага обмотки β и числа q (см. § 3-5). Значения $k_р$ находят по (3-6) или из табл. 3-13 для первой гармоники. Значения $k_у$ находят по (3-4) или по кривой на рис. 3-11.

Для однослойных обмоток k_y всегда равен единице, кроме обмоток с несплошной фазной зоной. Для двух-слойных обмоток k_y рассчитывается по (3-17).

Расчетное укорочение таких обмоток, выполненных с одной большой катушкой в катушечной группе, зависит от числа q и равно:

$$\beta = \frac{2}{3}\frac{q+1}{q}.$$

Обмоточный коэффициент двухслойной концентрической обмотки равен $k_{об}$ обычной двухслойной обмотки, на базе которой построена концентрическая (см. § 3-5).

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к $\beta=0{,}8$.

После расчета $k_{об1}$ уточняют значение потока Ф, Вб,

$$\Phi = \frac{k_E U_{1н}}{4k_B m_1 k_{об1} f_1} \qquad (6\text{-}22)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре B_δ, Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{p\Phi}{D l_\delta}. \qquad (6\text{-}23)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (см. рис. 6-11—6-13) более чем на 5%, следует принять другое значение числа $u_п$ и повторить расчет.

Если линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре при принятом числе пазов и эффективных проводников в пазу находятся в рекомендуемых пределах, переходят к расчету сечения эффективного проводника и обмоточного провода.

Сечение эффективных проводников, м², определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{эф1} = I_{1н}/aJ_1. \qquad (6\text{-}24)$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. На этом основании определены качественные зависимости допустимой плотности тока в обмотках различных машин. Она повышается с уменьшением габаритов машины, с увеличением допустимого нагрева обмотки при переходе на другой, более высокий класс нагревостойкости изоляции и с повышением интенсивности охлаждения (например, в машинах защищенного исполнения по сравнению с закрытыми обдуваемыми двигателями).

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока (AJ). Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учетом линейной нагрузки двигателя:

$$J = (AJ)/A. \qquad (6\text{-}25)$$

Значения AJ для асинхронных двигателей различного исполнения и мощности приведены на рис. 6-16.

Для всыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, однако в современных двигателях для повышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h>160$ мм) — не более 1,7 мм.

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со всыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник разделяется на несколько элементарных. Для этого по табл. П-28 подбирается сечение $q_{эл}$ и число элементарных проводников $n_{эл}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{эл}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка

к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{эл} n_{эл} = q_{эф}. \quad (6\text{-}26)$$

Во всыпных обмотках число элементарных проводников может быть взято до 10—12, но при большом $n_{эл}$ возрастают технологические трудности намотки катушек, поэтому в современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 5—6, а в обмотке, предназначенной для механизированной укладки, до 2—3, для чего увеличивают число параллельных ветвей. В двухполюсных двигателях $n_{эл}$ увеличивают, поскольку число параллельных ветвей в них не может быть более двух.

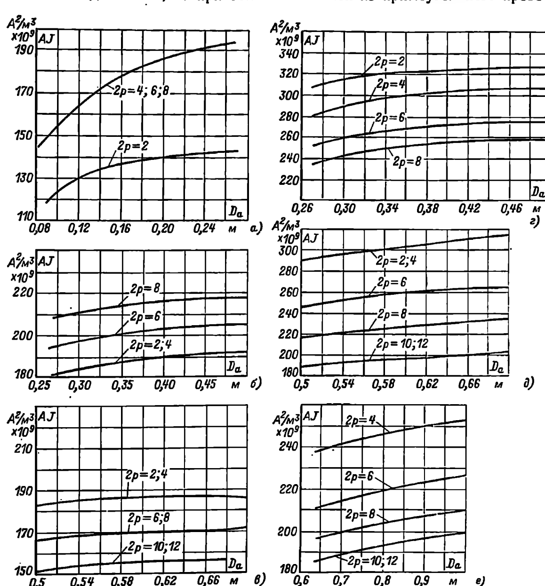


Рис. 6-16. Средние значения произведения (AJ) асинхронных двигателей.

а — со степенью защиты IP44, $h \leqslant 132$ мм; *б* — то же при $h = 160 \div 250$ мм; *в* — то же при $U = 280 \div 355$ мм (при продувном роторе); *г* — со степенью защиты IP23; при $h = 160 \div 250$ мм; *д* — то же при $h = 280 \div 355$ мм; *е* — то же при $U = 6000$ В.

При проектировании машин с обмоткой из прямоугольного провода сечение каждого проводника не должно быть взято более 17—20 мм², так как в этом случае становится заметно возрастание потерь на вихревые токи.

Если расчетное значение $q_{эф} > 20$ мм², то прямоугольные проводники подразделяют на элемен-

тарные так, чтобы $q_{эл} \leqslant 17 \div 20$ мм^2.

В обмотках из жестких катушек, укладываемых в открытые пазы, $n_{эл}$ обычно не более 2. При $n_{эл}=2$ они располагаются на одном уровне по высоте паза (см. рис. 3-1). Обмотку с четырьмя элементарными проводниками (см. рис. 3-1, *б*) в асинхронных двигателях применяют редко. Если обмотка выполняется из полужестких катушек, укладываемых в полуоткрытые пазы (см. рис. 3-9, *б*), то всегда образуется два элементарных проводника, так как катушки, расположенные на одной высоте в пазу, соединяются параллельно (см. § 3-1). При прямоугольных обмоточных проводах сечение эффективного проводника не должно превышать 35—40 мм^2, поэтому при большом номинальном токе в таких машинах выполняют наибольшее возможное число параллельных ветвей.

При одной и той же площади сечения прямоугольных проводников их линейные размеры $a \times b$ могут быть различны, поэтому окончательный выбор обмоточного провода производят одновременно с расчетом размеров зубцовой зоны.

После окончательного выбора $q_{эл}$, $n_{эл}$ и a следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравнению с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$J = \frac{I_{1н}}{a q_{эл} n_{эл}}. \qquad (6\text{-}27)$$

На этом расчет обмотки статора заканчивается. Некоторая корректировка, которая может потребоваться в ходе последующего расчета, как правило, не вносит существенных изменений в полученные данные.

6-5. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны та-

Допустимые значения индукции на различных участках

Участки магнитной цепи	Обозначение	IP44				
	$2p$	-	4	6	8	10 и 12
Ярмо статора	B_a		1,4—1,6		1,15—1,35	1,1—1,2
Зубцы статора при постоянном сечении (всыпная обмотка)	B_{z1}			1,7—1,9		1,6—1,8
Зубцы статора в наиболее узком сечении:						
при полуоткрытых пазах	$B_{z1\,max}$			1,75—1,95		
при открытых пазах	$B_{z1\,max}$			1,6—1,8		
Ярмо ротора:						
короткозамкнутого	B_j	$\leqslant 1{,}45$	$\leqslant 1{,}25$	$\leqslant 1{,}15$	$\leqslant 0{,}85$	
фазного	B_j	—	$\leqslant 1{,}25$	$\leqslant 1{,}05$	$\leqslant 0{,}75$	
в двигателях с $U=6000$ В	B_j	—	$\leqslant 1.55$	$\leqslant 1{,}30$	$\leqslant 0{,}10$	
Зубцы ротора при постоянном сечении (грушевидные пазы)	B_{z2}			1,75—1,85		
Зубцы ротора в наиболее узком сечении:						
короткозамкнутого	$B_{z2\,max}$	—	1,5—1,7		1,45—1.60	
фазного	$B_{z2\,max}$	—	1,85—2,05		1,75—1,9	

ким образом, чтобы, во-первых, площадь паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции и, во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Конфигурация пазов и зубцов определяется мощностью машины и типом обмотки. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора (табл. 6-10).

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в пазы с параллельными стенками (рис. 6-17 и 6-18). Зубцы в таких пазах имеют трапецеидальное сечение, и индукция в них неравномерна. Обычно задаются значениями допустимой индукции в ярме статора B_a и индукцией $B_{z\,max}$ в наиболее узком сечении зубца b_{zmin}, либо индукцией $B_{z^1/_3}$ в сечении зубца с шириной $b_{z^1/_3}$, взятом на расстоянии, равном 1/3 его высоты от наиболее узкой части зубца (рис. 6-17).

Таблица 6-10

магнитной цепи, Тл

IP23					
2	4	6	8	10	12
	1,45—1,6		1,2—1,4		1,1—1,3
1,9—2,1	1,8—2,0			1,7—1,9	
1,9—2,1	1,8—2,0				
1,7—1,9					
≤1,55	≤1,35	≤1,25	≤0,95		
—	≤1,35	≤1,15	≤0,85		
—	≤1,45	≤1,20	≤1,0		
1,8—1,95					
—	1,6—1,8	1,55—1,70			
—	2,0—2,2	1,9—2,05			

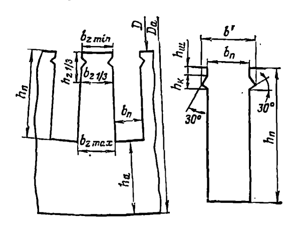


Рис. 6-17. К расчету размеров открытых прямоугольных пазов статора.

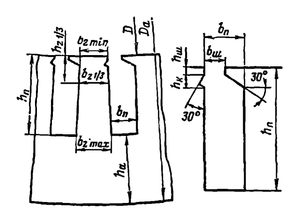


Рис. 6-18. К расчету размеров полуоткрытых прямоугольных пазов статора.

По выбранным значениям индукций определяются:

высота ярма статора, м,

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a\, l_{ст1}\, k_c}; \qquad (6\text{-}28)$$

минимальная ширина зубца, м,

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta\, t_1\, l_\delta}{B_{z1max}\, l_{ст1}\, k_c} \qquad (6\text{-}29)$$

или ширина зубца на расстоянии 1/3 его высоты от наиболее узкой части:

$$b_{z^1/_3} = \frac{B_\delta\, t_1\, l_\delta}{B_{z^1/_3}\, l_{ст1}\, k_c}. \qquad (6\text{-}30)$$

Значение коэффициента заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 6-11.

Размеры паза вначале определяются без учета размеров и числа

Таблица 6-11

Рекомендуемые марки холоднокатаной изотропной электротехнической стали, способы изолировки листов и коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора асинхронных двигателей

h, мм	U, в	Марка стали	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
			Способ изолировки листов	k_c	Способ изолировки листов	k_c	Способ изолировки листов	k_c
50—250	$\leqslant$660	2013	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	—	—
280—355	$\leqslant$660	2312	Лакировка	0,95	Оксидная пленка	0,97	Лакировка	0,95
400—560	6000	2411	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95	Лакировка	0,95

проводников обмотки, исходя только из допустимых значений индукций:

высота паза, м,

$$h_п = \frac{D_a - D}{2} - h_a; \quad (6\text{-}31)$$

ширина паза, м,

$$b_п = t_1 - b_{z\,min} \quad (6\text{-}32)$$

или

$$b_п = \frac{\pi (D + 2h_п/3)}{Z_1} b_{z^1/_3} \quad (6\text{-}33)$$

Обычно $b_п \approx (0{,}4 \div 0{,}5)\, t_1$.

Предварительно определенная ширина паза $b_п$ используется для выбора размеров обмоточного провода. Ширина проводника b должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т. е. корпусной, витковой (если она устанавливается в данной конструкции) и проводниковой ($2b_{из}$), а также припусков на сборку сердечников ($\Delta b_п$ см. ниже):

$$b = b_п - \Delta'_{из}, \quad (6\text{-}34)$$

где $\Delta'_{из} = 2b_{из} + \Delta b_п$.

Все данные по толщине этих видов изоляции берутся из соответствующих таблиц в зависимости от номинального напряжения и мощности машины, конструкции и класса нагревостойкости изоляции (см. гл. 3).

Если эффективный проводник обмотки состоит из двух элементарных проводников, то ширина каждого из них будет равна:

$$b = 0{,}5\,(b_п - \Delta'_{из}). \quad (6\text{-}35)$$

Значения по (6-34) и (6-35) являются предварительными. Окончательная ширина проводника находится по таблице стандартных размеров обмоточных проводов (табл. П-29). Из этой таблицы по предварительно определенной ширине проводника и по его расчетному сечению подбираются наиболее близкие к ним стандартные значения $q_{эл}$ и b и соответствующая им высота проводника a. Высота проводника при этом не должна превышать 2,5—3,0 мм, так как при большей высоте в проводниках, лежащих друг над другом в одном пазу, начинает проявляться эффект вытеснения тока, вызывающий неравномерное распределение плотности тока по сечению проводников и увеличивающий потери в меди обмотки. Действие этого эффекта возрастает с увеличением числа проводников по высоте паза, поэтому в многовитковых катушках высота проводников не должна превышать указанных пределов, а при малом числе витков она может быть выбрана несколько большей.

Слишком малая высота проводников ($a < 1$ мм) вызывает значительные трудности при изготовлении катушек, так как при изгибе проводников на ребро во время намотки катушек могут произойти разрывы провода или его изоляции.

Нежелательно также применение прямоугольных проводов с близкими размерами a и b, так как в этом случае провод во время намотки катушек часто перекручивается и при рихтовке может быть поврежден изоляция на его гранях.

После уточнения размеров проводников составляется подробная спецификация паза (таблица заполнения паза) с указанием размеров проводов, названий, размеров

и числа слоев изоляционных материалов, различных прокладок и т. п.

Сумма размеров по высоте и ширине паза всех проводников и изоляции с учетом необходимых допусков на разбухание изоляции и на укладку обмотки определяет размеры части паза, занятой обмоткой.

В боковых стенках верхней части открытых пазов выполняют выемки для крепления пазовых клиньев (см. рис. 6-17). Глубина выемок под клин, высота шлица $h_ш$ и высота клиновой части паза $h_к$ возрастают с увеличением мощности машины и ширины ее пазов. Обычно в асинхронных двигателях общего назначения $b'-b_п=2\div5$ мм, $h_ш=0,5\div1,0$ мм и $h_к=3\div3,5$ мм в машинах средней мощности и достигает 5 мм в крупных машинах.

Полученные при расчете заполнения паза его размеры являются размерами паза «в свету», т. е. размерами реального паза в собранном шихтованном сердечнике с учетом неизбежной при этом «гребенки», образующейся за счет допусков при штамповке листов и шихтовке магнитопроводов. Действительные размеры паза в штампе, т. е. в каждом отдельном листе, будут несколько больше на припуски на сборку.

h, мм	Припуски, мм, по ширине паза $\Delta b_п$	Припуски, мм, по высоте паза $\Delta h_п$
50—132	0,1	0,1
160—250	0,2	0,2
280—355	0,3	0,3
400—560	0,4	0,3

После того как все размеры паза в штампе окончательно установлены, определяют ширину зубцов $b_{z\,min}$ и $b_{z\,max}$ или $b_{z^1/_3}$:

$$b_{zmin}=t_1-b_п; \qquad (6\text{-}36)$$

$$b_{zmax}=t_1\left(1+\frac{2h_п}{D}\right)-b_п; \qquad (6\text{-}37)$$

$$b_{z^1/_3}=t_1\left(1+\frac{2h_п}{3D}\right)-b_п. \qquad (6\text{-}38)$$

Расчетная высота зубцов h_z при прямоугольных пазах берется равной высоте паза:

$$h_z=h_п.$$

Обмотку из подразделенных катушек в машинах общего назначения с номинальным напряжением $U_н\leqslant660$ В укладывают в полуоткрытые пазы (см. рис. 6-18). Ширина шлица паза $b_ш$ выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз, поэтому $b_ш=0,5b_п+(1,0\div1,5)$ мм. Высоту шлица и высоту клиновой части

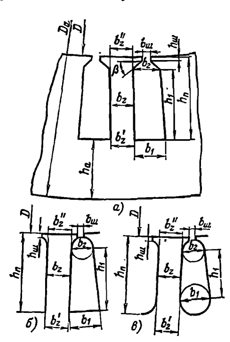


Рис. 6-19. К расчету размеров зубцовой зоны всыпной обмотки статора.

паза выполняют в пределах $h_ш=0,5\div0,8$ мм и $h_к=2,5\div3,5$ мм (бо́льшие значения берутся при широких пазах и большей мощности двигателей). Выбор размеров проводников, расчет заполнения паза и определение его размеров в свету и в штампе производят так же, как и для открытых пазов. Ширину и расчетную высоту зубцов определяют по (6-36)—(6-38).

Круглые обмоточные провода всыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при всыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора (рис. 6-19). Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не меняется и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное

напряжение трапецеидальных зубцов при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными стенками узких участков с высокой индукцией, напряженность поля в которых резко возрастает, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов.

Для всыпной обмотки могут быть выбраны пазы показанной на рис. 6-19 *а—в* конфигурации. В двигателях серии 4А выполняются только трапецеидальные пазы (рис. 6-19, *а*) с углом наклона граней клиновой части $\beta=45°$ у двигателей с $h\leqslant 250$ мм и $\beta=30°$ у двигателей с $h\geqslant 280$ мм при $2p=10$ и 12.

Принцип расчета размеров паза всыпной обмотки остается таким же, как и для пазов с прямоугольными проводами. Сначала проводится предварительный выбор размеров, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора

$$b_z=\frac{B_\delta t_1 l_\delta}{B_{z\text{ср}} l_{\text{ст}1} k_\text{с}} \qquad (6\text{-}39)$$

и h_a по (6-28).

После расчета коэффициента заполнения паза проводниками обмотки полученные значения уточняются. Однако стремление выполнить зубцы с параллельными гранями накладывает дополнительные условия на возможные соотношения размеров паза. Это вызывает известные трудности расчета зубцовой зоны, который рекомендуется проводить в следующей последовательности (расчетные формулы приведены только для пазов, показанных на рис. 6-19, *а*; для других конфигураций они могут быть легко получены, исходя из условия сохранения постоянства ширины зубцов).

По допустимым индукциям в ярме и зубцах статора (см. табл. 6-10) из (6-28) и (6-39) определяются высота ярма h_a и ширина зубца b_z статора. Далее находятся размеры паза в штампе, м,

$$h_\text{п}=\frac{D_a-D}{2}-h_a; \qquad (6\text{-}40)$$

$$b_1=\frac{\pi(D+2h_\text{п})}{Z_1}-b_{z1}; \qquad (6\text{-}41)$$

при $\beta=45°$

$$b_2=\frac{\pi(D+2h_\text{ш}-b_\text{ш})-Z_1 b_{z1}}{Z_1-\pi}; \qquad (6\text{-}42)$$

при $\beta=30°$

$$b_2=\frac{\pi\left(D+2h_\text{ш}-b_\text{ш}/\sqrt{3}\right)-Z_1 b_z}{Z_1-\pi/\sqrt{3}} \qquad (6\text{-}43)$$

Полученные размеры округляют до десятых долей миллиметра.

Высоту шлица паза $h_\text{ш}$ обычно выполняют в пределах от 0,5 до 1 мм в зависимости от мощности двигателя. Следует иметь в виду, что $h_\text{ш}$ должна быть достаточной для обеспечения механической прочности кромок зубцов, удерживающих в уплотненном состоянии проводники паза после заклиновки пазов. Однако увеличение $h_\text{ш}$ приводит к возрастанию потока рассеяния паза, что в большинстве случаев нежелательно. В серии 4А в двигателях с $h\leqslant 132$ мм принимают $h_\text{ш}=0{,}5$ мм, в двигателях с $h_\text{ш}\geqslant 160$ мм увеличивают до $h_\text{ш}=1$ мм.

Ширину шлица паза принимают равной $b_\text{ш}=d_\text{из}+(1{,}5\div 2$ мм), где $d_\text{из}$ — диаметр изолированного обмоточного провода, мм. Размер $b_\text{ш}$ должен обеспечить возможность свободного пропуска проводников обмотки через шлиц паза с учетом толщины изоляционных технологических прокладок, устанавливаемых при укладке обмотки для предохранения изоляции проводников от повреждений об острые кромки шлица. В сериях асинхронных машин размер $b_\text{ш}$ обычно нормализуется. В серии 4А он выполняется равным от 1,8 мм в малых машинах до 4 мм в более крупных. Средние значения $b_\text{ш}$ для двигателей при различных h и $2p$ приведены в табл. 6-12.

В клиновой части паза располагаются пазовые крышки (в машинах с $h\leqslant 160$ мм) или пазовые клинья (в более крупных машинах). Поэтому при расчете площади поперечного сечения паза эти участки не учитывают.

Размеры паза рассмотренной конфигурации могут быть определены также графоаналитическим ме-

Таблица 6-12

Средние значения ширины шлица полузакрытых пазов статора $b_ш$, мм

h, мм	Число полюсов $2p$				
	2	4	6—8	10	12
50—63	1,8	1,8	1,8	—	—
71	2,0	2,0	2,0	—	—
80, 90	3,0	3,0	2,7	—	—
100, 112	3,5	3,5	3,0	—	—
132	4,0	3,5	3,5	—	—
160—250	4,0	3,7	3,7	—	—
280—315	—	—	—	4,0	4,0

тодом. Для этого вначале строится равнобедренная трапеция (рис. 6-20, *а*), верхнее основание которой

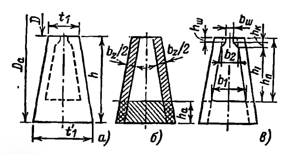


Рис. 6-20. К графоаналитическому методу определения размеров паза статора.

равно в выбранном масштабе пазовому делению t_1, нижнее основание $t_1' = t_1 D_a/D$, а высота $h = (D_a - D)/2$. Такая трапеция представляет собой как бы вырезанный из листа статора сектор пазового деления, в котором должны разместиться паз (ось паза совпадает с осью трапеции), прилегающие к нему с обеих сторон половины сечений зубцов и участок ярма статора. По допустимым индукциям B_z и B_a определяют ширину зубца по (6-39) и высоту ярма по (6-28). На построенной трапеции линиями, параллельными ее боковым граням, отсекают участки шириной 0,5 b_z и линией, параллельной ее основаниям, — участок шириной h_a (рис. 6-20, *б*). В оставшуюся часть трапеции (на рис. 6-20, *б* — не заштрихована) вписывают контур паза выбранной конфигурации (рис. 6-20, *в*). Его основные размеры b_1, b_2 и $h_п$ обеспечивают параллельность боковых граней зубцов при наименьших возможных с точки зрения допустимой индукции размерах зубцов и ярма.

Для достижения достаточной точности построение должно быть выполнено в крупном масштабе (например, 10 : 1), при котором возможна достоверность определения размеров паза с точностью до 0,1 мм.

Площадь поперечного сечения паза в штампе, м²,

$$S_п = \frac{b_1 + b_2}{2} h_1, \qquad (6\text{-}44)$$

где

$$h_1 = h_п - (h_ш + h_к); \qquad (6\text{-}45)$$

высота клиновой части паза

$$h_к = \frac{b_2 - b_ш}{2} \text{ при } \beta = 45°$$

и

$$h_к = \frac{b_2 - b_ш}{2\sqrt{3}} \text{ при } \beta = 30° \qquad (6\text{-}46)$$

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза в свету и учесть площадь сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией $S_{из}$ и прокладками в пазу $S_{пр}$. Размеры паза в свету определяются с учетом припусков на шихтовку и сборку сердечников $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$:

$$b_1' = b_1 - \Delta b_п; \quad b_2' = b_2 - \Delta b_п; \quad h_1' = h_1 - \Delta h_п, \qquad (6\text{-}47)$$

где $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$ — см. стр. 177.

Площадь корпусной изоляции, м²,

$$S_{из} = b_{из}(2h_п + b_1 + b_2), \qquad (6\text{-}48)$$

где $b_{из}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу (см. гл. 3), м.

Площадь прокладок в пазу, м²:

для двигателей с $h = 180 \div 250$ мм

$$S_{пр} = 0{,}4 b_1 + 0{,}9 b_2; \qquad (6\text{-}49)$$

для двигателей с $h \geqslant 280$ мм

$$S_{пр} = 0{,}6 (b_1 + b_2). \qquad (6\text{-}50)$$

При однослойной обмотке $S_{пр} = 0$.

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся для размещения

Таблица 6-13

Расчетные размеры трапецеидальных зубцов статоров при открытых и полуоткрытых пазах (статоры машин переменного тока с обмоткой из прямоугольного провода — рис. 6-17 и 6-18)

Размер	Рис. 6-17	Рис. 6-18
$b_{z\,min}$	$\frac{\pi D}{Z} - b_п$	$\pi \frac{D+2(h_ш+h_к)}{Z} - b_п$
$b_{z\,max}$	$\pi \frac{D+2h_п}{Z} - b_п$	$\pi \frac{D+2h_п}{Z} - b_п$
h_z	$h_п$	$h_п$

проводников обмотки,

$$S'_п = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_1 - S_{из} - S_{пр}. \quad (6\text{-}51)$$

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза

$$k_з = \frac{d^2_{из} u_п n_{эл}}{S'_п}$$

(см. § 3-3), который должен находиться в пределах, указанных в табл. 3-12.

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения h_a или b_z или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого при их расчете значения допустимой индукции. Индукция в зубцах и ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 6-10, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Если полученное значение $k_з$ выше указанных пределов и его не удается уменьшить до допустимых пределов даже при размерах h_a и b_z, рассчитанных по наибольшим допустимым значениям B_a и B_z, или перейдя на большее сечение элементарного провода при уменьшении $n_{эл}$, то следует увеличить длину магнитопровода или просчитать другой вариант двигателя, изменив главные размеры.

Ширина зубца и расчетная высота паза определяются по формулам табл. 6-13 и 6-14. Обычно при всыпной обмотке $b_z = b'_z = b''_z$. В некоторых случаях возможно некоторое расхождение значений b'_z и b''_z, поэтому рекомендуется рассчитать оба значения b'_z и b''_z и при небольшом расхождении результатов взять среднюю расчетную ширину зубца: $b_z = (b'_z + b''_z)/2$. При больших расхождениях следует изменить соотношения размеров пазов либо проводить расчет магнитного напряжения зубцов так же, как при прямоугольных пазах (см. ниже).

6-6. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его

Таблица 6-14

Расчетные размеры зубцов статоров при трапецеидальных или грушевидных пазах в машинах со всыпной обмоткой (рис. 6-19)

Размер	Рис. 6-19, а	Рис. 6-19, б	Рис. 6-19, в
b'_z	$\pi \frac{D+2h_п}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_п}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_п-b_1}{Z} - b_1$
b''_z	$\pi \frac{D+2(h_п-h_1)}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_ш+b_2}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_ш+b_2}{Z} - b_2$
h_z	$h_п$	$h_п$	$h_п-0{,}1\,b_1$

магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть суммарной МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему

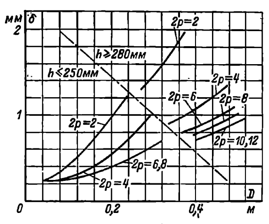


Рис. 6-21. К выбору воздушного зазора в асинхронных двигателях.

возрастает его cos φ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуд пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей. Такие расчеты проводят на ЭВМ по оптимизационным программам. При учебном проектировании величину воздушного зазора следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей либо следующими приближенными формулами.

Для двигателей мощностью менее 20 кВт воздушный зазор, м:

при $2p=2$

$$\delta \approx (0{,}3 + 1{,}5D) \cdot 10^{-3}; \quad (6\text{-}52)$$

при $2p \geqslant 4$

$$\delta \approx (0{,}25 + D) \cdot 10^{-3}. \quad (6\text{-}53)$$

Для двигателей средней и большой мощности

$$\delta \approx \frac{D}{1{,}2}\left(1 + \frac{9}{2p}\right) \cdot 10^{-3}. \quad (6\text{-}54)$$

Зависимость воздушного зазора от внутреннего диаметра статора у двигателей серии 4А приведена на рис. 6-21.

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. В быстроходных двигателях частота пульсаций больше, чем в тихоходных, так как она пропорциональна частоте вращения. Для уменьшения этого вида потерь δ в быстроходных двигателях выполняют бóльшим, что уменьшает амплитуду пульсаций.

В крупных высоковольтных двигателях воздушный зазор также выполняют большим, обычно 1,5—2,0 мм. В высоковольтных машинах применяют только открытые пазы на статоре и при малых зазорах это может привести к большим пульсациям индукции.

Воздушный зазор, полученный по эмпирическим формулам или из графиков, следует округлять до 0,05 мм при $\delta < 0{,}5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0{,}5$ мм. Например, зазор выбирают равным 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т. д.

Выбранный по приведенным рекомендациям воздушный зазор, как правило, превышает минимально допустимый по механическим условиям. Однако все же необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10% воздушного зазора.

6-7. РАСЧЕТ РОТОРА

а) Фазные роторы

Для нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы фазная обмотка ротора имела столько же фаз и столько же полюсов, как и обмотка статора, т. е. $m_2 = m_1$ и $p_2 = p_1$.

Число пазов ротора Z_2 должно отличаться от числа пазов статора. При расчете задаются обычно числом пазов на полюс и фазу ротора $q_2=q_1 \pm K$, тогда $Z_2=Z_1 q_2/q_1$. В большинстве случаев $K=1$ или $K=1/2$. При характерном для обмоток статора асинхронных двигателей целом q_1 обмотка ротора имеет целое или дробное число q_2 со знаменателем дробности, равным 2. Обмотки ротора со знаменателем дробности, большим двух, встречаются редко (в основном в крупных многополюсных машинах).

Число витков в фазе обмотки ротора выбирают, исходя из допустимого напряжения на контактных кольцах при пуске двигателя. Поскольку ЭДС на контактных кольцах E_2 определяется магнитным потоком, который при постоянном уровне индукции в воздушном зазоре растет с увеличением габаритов двигателя, то в крупных машинах напряжение на контактных кольцах может достигнуть слишком большого значения и привести к перекрытию или пробою изоляции колец.

Чтобы E_2 не достигала опасного значения, обмотку роторов крупных машин выполняют с малым числом витков в фазе. В современных асинхронных двигателях наиболее распространенной обмоткой такого типа является двухслойная стержневая обмотка, при которой в пазу размещаются только два эффективных проводника. Для уменьшения количества межгрупповых соединений она выполняется волновой.

В отдельных машинах можно встретить и однослойную стержневую обмотку ротора. Она применяется как исключение в крупных машинах специального исполнения, так как требует сложной в технологическом отношении конструкции лобовых частей стержней.

В небольших по габаритам машинах опасности чрезмерного увеличения E_2 нет, так как поток в них невелик и число витков в фазе обмотки ротора увеличивают, чтобы снизить ток через щеточные контакты, что особенно важно в двигателях с постоянно прилегающими к контактным кольцам щетками. Такие обмотки выполняют из многовитковых катушек. Описание конструкции и схем обмоток фазных роторов дано в гл. 3.

Расчет обмотки фазного ротора проводят в следующей последовательности.

Для определения числа витков в фазе роторов с катушечной обмоткой предварительно задаются ЭДС фазы E_2, при которой напряжение на контактных кольцах в момент пуска двигателя находилось бы в пределах $U_к=\sqrt{3}E_2=\sqrt{3}U_2=150 \div 250$ В (реже до 500 В). Обмотки роторов в большинстве случаев соединяют в звезду. При соединении в треугольник $U_к=U_2=E_2$.

Число витков в фазе

$$w_2=\frac{E_2}{4k_b k_{об2} f_2 \Phi}=\frac{E_2}{k_E U_{1н}} \frac{f_1}{f_2} w_1 \frac{k_{об1}}{k_{об2}}.$$

Так как E_2 выбрана приближенно и может быть несколько изменена, то, принимая отношение обмоточных коэффициентов $k_{об1}/k_{об2}=1$ и $k_E=1$ и учитывая, что при $s=1$ отношение $f_1/f_2=1$, получаем:

$$w_2=\frac{E_2}{U_{1н}} w_1. \qquad (6\text{-}55)$$

Число эффективных проводников в пазу

$$u_{п2}=\frac{2w_2 m_2}{Z_2}=\frac{w_2}{p_2 q_2} \qquad (6\text{-}56)$$

должно быть четным, поэтому полученное значение округляют, после чего уточняют число витков в фазе:

$$w_2=u_{п2} p_2 q_2. \qquad (6\text{-}57)$$

В роторах с двухслойной стержневой обмоткой $u_{п2}$ всегда равно двум, поэтому w_2 определяют без предварительного выбора E_2:

$$w_2=2p_2 q_2=\frac{Z_2}{m_2}. \qquad (6\text{-}58)$$

После расчета W_2 необходимо проверить напряжение на кольцах ротора:

$$U_к=\sqrt{3}\, U_{1н} \frac{w_2}{w_1}. \qquad (6\text{-}59)$$

В двигателях со стержневой обмоткой ротора $U_к$ обычно не превышает 800—1000 В, но при расчете двигателей мощностью 1000 кВт и

более иногда получают значение $U_к$ более 1500—2000 В. Для снижения $U_к$ в обмотке ротора иногда выполняют две параллельные ветви. При этом необходимо помнить, что стержневая волновая обмотка с $a=2$ может быть выполнена симметричной только при целом числе q_2.

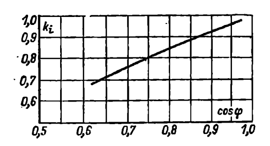


Рис. 6-22. Коэффициент k_i в зависимости от cos φ.

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора, А,

$$I_2 = k_i I_1 \nu_i, \qquad (6\text{-}60)$$

где k_i — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_1/I_2. Его приближенное значение может быть взято из кривой рис. 6-22 в зависимости от номинального cos φ, которым задавались в начале расчета;

ν_i — коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}}. \qquad (6\text{-}61)$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора, м²,

$$q_{эф2} = I_2/J_2 \qquad (6\text{-}62)$$

и при стержневой обмотке $q_с=q_{эф2}$.

Здесь J_2 — допустимая плотность тока, А/м²; в роторах с катушечной обмоткой при классах нагревостойкости изоляции B и F $J_2=(5\div6{,}5)\times10^6$ А/м², а в более мощных двигателях со стержневой обмоткой $J_2=(4{,}5\div5{,}5)\cdot10^6$ А/м².

Эффективные проводники независимо от их размеров на элементарные не подразделяют, так как эффект вытеснения тока в обмотке роторов при номинальных режимах асинхронных двигателей из-за малой частоты ($f_2=sf_1$) не проявляется.

Окончательные размеры проводников обмотки ротора определяют по табл. П-29 одновременно с расчетом размеров пазов.

В фазных роторах с катушечной

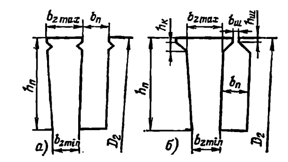


Рис. 6-23. Пазы ротора.

а — открытые; *б* — полузакрытые.

обмоткой выполняют прямоугольные открытые пазы; при стержневой обмотке — прямоугольные полузакрытые пазы с узким шлицем (рис. 6-23). Ширину паза выбирают, исходя из примерного соотношения $b_{п2}=(0{,}4\div0{,}45)\ t_2$. Примеры выполнения изоляции обмоток фазных роторов приведены в табл. 3-10 и 3-11.

При расчете заполнения паза проводниками и изоляцией следует учитывать припуск на сборку магнитопровода (§ 6-5). Высоту клиновой части паза при расчете расположения проводников не учитывают. В двигателях с $h=280\div355$ мм выполняют $h_к=2{,}5$ мм и $h_к=3{,}5$ мм при $h=400$ мм. Ширину шлица обычно принимают равной $b_ш=1{,}5$ мм, а высоту $h_ш=1{,}0$ мм.

После предварительных расчетов необходимо уточнить размер зубца ротора в наиболее узком сечении b_{z2min} и проверить соответствие индукции B_{z2max} ее допустимому значению для данного исполнения двигателя по табл. 6-10:

$$b_{z2min} = \frac{\pi (D_2 - 2h_{п2})}{z_2} - b_{п2}; \qquad (6\text{-}63)$$

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2min} l_{ст2} k_с}. \qquad (6\text{-}64)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с открытыми пазами (рис. 6-23, *а*)

равна:

$$b_{z2max} = \frac{\pi D_2}{z_2} - b_{п2}. \qquad (6\text{-}65)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с полузакрытыми пазами (рис. 6-23, *б*)

$$b_{z2max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_ш + h_к)}{z_2} - b_{п2}. (6\text{-}66)$$

Расчетная высота зубцов при пазах обеих конфигураций принимается равной высоте паза: $h_{z2} = h_{п2}$.

б) Короткозамкнутые роторы

Короткозамкнутые обмотки роторов в отличие от всех других существующих обмоток не имеют определенного числа фаз и числа полюсов[1]. Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности, определило возможность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа пар полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет $^1/_2$ витка, т. е. $w_2 = {^1/_2}$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора (рис. 6-24). Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2\, m_2} = \frac{1}{2p_2}. \qquad (6\text{-}67)$$

При проектировании зубцовой зоны короткозамкнутых роторов особое внимание следует уделять выбору числа пазов ротора. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины помимо основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты,

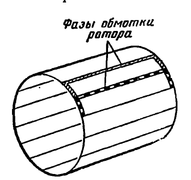


Рис. 6-24. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора.

которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками. В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник.

Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента.

В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Это так называемые зубцовые гармоники, которые вызывают шум и вибрацию при работе двигателя при нормальном режиме. Появление зубцовых гармоник особенно заметно при малых воздушных зазорах, характерных для асинхронных двигателей небольшой мощности.

Исследования, проведенные для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с раз-

---

[1] Обмотка короткозамкнутого ротора может быть выполнена и в виде фазной изолированной от корпуса обмотки, начала и концы фаз которой замкнуты между собой. Такое исполнение находит применение лишь в редких случаях в специальных машинах. Расчет такой обмотки аналогичен расчету обмотки фазного ротора.

Таблица 6-15

Рекомендуемые числа пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

$2p$	Число пазов статора	Число пазов ротора: Пазы без скоса	Пазы со скосом
2	12	9,* 15*	—
	18	11*, 12*, 15*, 21*, 22*	14*, (18), 19* 22*, 26, 28*, (30), 31, 33, 34, 35
	24	15*, (16*), 17*, 19, 32	18, 20, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	(18), 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9*	15*
	18	10* 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57,59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63, 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163
14	84	74, 94, 102, 104, 106	75, 77, 79, 89, 91, 93, 103
	126	106, 108, 116, 136, 144, 146, 148, 150, 152, 154, 158	107, 117, 119, 121, 131, 133, 135, 145
16	96	84, 86, 106, 108, 116, 118	90, 102
	144	120, 122, 124, 132, 134, 154, 156, 164, 166, 168, 170, 172	138, 150

Примечания: 1. В скобках взяты числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые в основном в машинах малой мощности.

личными числами $2p$. Рекомендации по выбору Z_2 при известных Z_1 и $2p$ сведены в табл. 6-15, в которой предлагается несколько возможных вариантов чисел пазов ротора при данных Z_1 и $2p$. В двигателях малой мощности обычно выполняют $Z_2 < Z_1$. Это объясняется рядом причин технологического характера, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2 > Z_1$, с тем чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

Ток в стержне определяется по (6-60). При этом с учетом принятых для короткозамкнутой обмотки чисел фаз и витков в фазе коэффициент приведения токов

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}} = \frac{2 m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2}. \quad (6\text{-}68)$$

Сечение стержней, м²,

$$q_c = I_2/J_2. \qquad (6\text{-}69)$$

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах $J_2 = (2,5 \div 3,5) \cdot 10^6$ А/м², а при защищенном исполнении на 10—15% выше, причем для машин больших мощностей следует брать меньшие значения плотности тока.

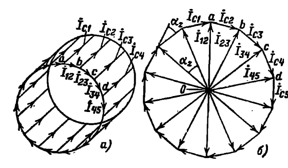


Рис. 6-25. К расчету тока в замыкающих кольцах короткозамкнутой обмотки ротора.

В обмотке ротора, выполненной из медных стержней, плотность тока принимают несколько большей: $J_2 = (4,0 \div 8,0) \cdot 10^6$ А/м² (бóльшие значения соответствуют машинам меньшей мощности).

Ток в короткозамкнутых кольцах находят, исходя из следующих соображений.

Примем направления токов в стержнях ротора $\dot I_{c1}$, $\dot I_{c2}$, $\dot I_{c3}$... и на участках замыкающих колец, соединяющих эти стержни, $\dot I_{12}$, $\dot I_{23}$, $\dot I_{34}$, как показано на рис. 6-25, *а*.

Тогда для узлов *a*, *b*, *c* и т. д. можно записать:

$$\left.\begin{aligned} \dot I_{c2} &= \dot I_{12} - \dot I_{23}; \\ \dot I_{c3} &= \dot I_{23} - \dot I_{34}; \\ \dot I_{c4} &= \dot I_{34} - \dot I_{45}. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}70)$$

Токи в стержнях сдвинуты относительно друг друга на угол $\alpha_z = 2p\pi/Z_2$. Начертив многоугольник токов в стержнях (рис. 6-25, *б*), стороны которого являются векторами токов стержней, сдвинутых по фазе на угол α_z, убеждаемся, что системе уравнений (6-70) будут соответствовать направления токов на участках колец, показанные на рис. 6-25, *б*. Угол между их векторами тоже равен α_z. Найдем соотношение между токами в стержнях и в участках колец, для чего рассмотрим один из треугольников векторной диаграммы, образованный, например, векторами токов $\dot I_{12}$, $\dot I_{23}$, $\dot I_{c2}$. Из этого треугольника имеем:

$$I_{c2} = 2I_{23} \sin\frac{\alpha_z}{2}.$$

Так как это соотношение справедливо для любого из элементов диаграммы токов, то, обозначив токи в кольце $I_{кл}$, а токи в стержнях I_2, можем записать:

$$I_{кл} = I_2/\Delta, \qquad (6\text{-}71)$$

где

$$\Delta = 2\sin\frac{\alpha z}{2} = 2\sin\frac{\pi p}{Z_2}. \qquad (6\text{-}72)$$

Выражение (6-71) является расчетной формулой для определения тока в замыкающих кольцах короткозамкнутых роторов.

Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{кл}$ выбирают в среднем на 15—20% меньше, чем в стержнях. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, замыкающие кольца, имея лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение. Во-вторых, в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

Площадь поперечного сечения замыкающих колец, м²,

$$q_{кл} = I_{кл}/J_{кл}. \qquad (6\text{-}73)$$

Сечение колец в роторах со вставными стержнями представляет собой прямоугольник, размеры которого ($a_{кл} \times b_{кл}$) выбирают таким образом, чтобы $b_{кл} = (1,1 \div 1,25)\, h_{п2}$ (рис. 6-26).

Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным сечением в виде неправильной трапеции, прилегающей одним из оснований к торцу сердечника рото-

ра. Средняя высота кольца выбирается из условия $b_{кл} \geq 1{,}2\ h_{п2}$.

Одновременно с заливкой стержней и колец на замыкающих кольцах отливаются вентиляционные лопатки длиной несколько меньшей, чем длина вылета лобовых частей обмотки статора. Количество вентиляционных лопаток выбирают равным простому числу, приблизительно в 2—3 раза меньшему, чем число пазов ротора (см. гл. 9).

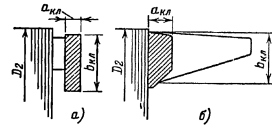


Рис. 6-26. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора.

а — со сварной обмоткой; *б* — с литой обмоткой.

Расчетное сечение замыкающих колец литой обмотки, м², принимают $q_{кл} = a_{кл} b_{кл}$, не учитывая утолщения в местах примыкания вентиляционных лопаток.

Форма паза короткозамкнутого ротора определяется требованиями к пусковым характеристикам двигателя, его мощностью и числом полюсов. В роторах современных асинхронных двигателей применяют грушевидные, прямоугольные или фигурные пазы (см. рис. 3-8). Фигурные пазы могут быть лопаточными, колбообразными и трапецеидальными. Довольно большое распространение, особенно в двигателях зарубежных фирм, получили двухклеточные роторы. Встречаются также двигатели с более сложной конструкцией зубцовой зоны ротора, например с чередующимися пазами различной конфигурации.

Большинство фигурных пазов применяют только при литых роторных обмотках. С медными вставными стержнями могут быть изготовлены лишь роторы с простейшими по конфигурации пазами (круглыми, прямоугольными, трапецеидальными, колбообразными) и двухклеточные роторы, верхние и нижние стержни которых имеют прямоугольное или круглое сечения.

Медные шины трапецеидального и в особенности колбообразного сечения имеют строго ограниченный сортамент, поэтому двигатели с такими роторами не нашли широкого применения

В последние годы в крупных асинхронных машинах короткозамкнутую обмотку иногда выполняют из прямоугольных алюминиевых шин, как, например, в двигателях серии АН-2. Стержни устанавливают в открытые пазы ротора и закрепляют, расчеканивая их верхнюю часть.

В двигателях с высотами оси вращения до 400 мм наиболее широко распространены роторы с литыми обмотками, при которых возможно выполнение любых требующихся по расчету конфигураций и размерных соотношений стержней с учетом возможности качественной заливки.

Выполняют также двухклеточные роторы с литой обмоткой. Они, как правило, имеют фигурные стержни рабочей обмотки и общие замыкающие кольца.

Выбирая ту или иную коструктцию клетки, форму и размерные соотношения стержней, следует исходить из требований к пусковым характеристикам двигателей и возможности размещения паза на зубцовом делении ротора, при котором обеспечивается нормальный уровень индукции в зубцах и ярме. Кроме того, необходимо учитывать влияние размерных соотношений пазов на индуктивное сопротивление обмотки ротора. При любой конфигурации паза уменьшение ширины верхней части стержней и увеличение их высоты приводят к увеличению пускового момента, но одновременно увеличивается коэффициент магнитной проводимости паза и растет индуктивное сопротивление обмотки ротора. Это в некоторых случаях может играть положительную роль — как фактор, ограничивающий пусковые токи, но в то же время увеличение индуктивного сопротивления ротора приводит к ухудшению коэффициента мощности при номи-

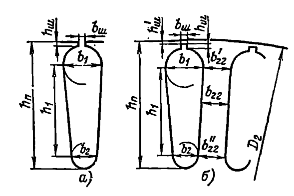


Рис. 6-27. Грушевидные пазы короткозамкнутого ротора.

а — полузакрытые; *б* — закрытые.

нальном режиме работы и к снижению M_{max}.

То же характерно для двигателей с двухклеточными роторами, имеющими большие пусковые моменты, но низкие коэффициенты мощности при номинальном режиме, так как поток пазового рассеяния в перемычке между стержнями рабочей и пусковой клеток достигает больших значений. Поэтому для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует прежде всего ориентироваться на пазы ротора с широкой верхней частью — грушевидные (см. рис. 3-8). Пазы других форм (прямоугольные, фигурные) или двойную клетку применяют только в тех случаях, когда пусковые характеристики двигателя с ротором, имеющим грушевидные пазы, не удовлетворяют требованиям, поставленным в техническом задании.

В асинхронных двигателях с короткозамкнутым ротором серии 4А с высотой оси вращения $h \leqslant 250$ мм выполняют грушевидные пазы и литую обмотку на роторе (рис. 6-27,*а*). В двигателях с $h < 160$ мм пазы имеют узкую прорезь со следующими размерами: $b_ш = 1{,}0$ мм и $h_ш = 0{,}5$ мм при высоте оси вращения $h < 100$ мм; $b_ш = 1{,}5$ мм и $h_ш = 0{,}75$ мм при высоте вращения $h = 112 \div 132$ мм. В двигателях с $h = 160 \div 250$ мм выполняют грушевидные закрытые пазы (рис. 6-26,*б*) с размерами шлица $b_ш = 1{,}5$ мм и $h_ш = 0{,}7$ мм. Высота перемычки над пазом в двигателях с $2p \geqslant 4$ выполняется равной $h'_ш = 0{,}3$ мм, в двухполюсных двигателях $h'_ш = 1{,}0 \div 1{,}5$ мм.

Размеры паза b_1, b_2 и h_1 (рис. 6-27) рассчитывают, исходя из сечения стержня q_c и из условия постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_1 = \frac{\pi\left(D_2 - 2h_ш - 2h'_ш\right) - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2}; \quad (6\text{-}74)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2\left(\dfrac{Z_2}{\pi} + \dfrac{\pi}{2}\right) - \dfrac{q_c}{4}}{\dfrac{Z_2}{\pi} - \dfrac{\pi}{2}}}; \quad (6\text{-}75)$$

$$h_1 = (b_1 - b_2)\frac{Z_2}{2\pi}. \quad (6\text{-}76)$$

Ширина зубцов ротора определяется по допустимой индукции B_{z2} (см. табл. 6-10):

$$b_{z2} = \frac{B_\delta t_2 l_2}{B_{z2} l_{ст2} k_c}. \quad (6\text{-}77)$$

После расчета размеры паза следует округлить до десятых долей миллиметра и уточнить площадь сечения стержня q_c:

$$q_c = \frac{\pi}{8}\left(b_1^2 + b_2^2\right) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1. \quad (6\text{-}78)$$

Условия высококачественной заливки пазов алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза в двигателях с $h \leqslant 132$ мм был не менее 1,5—2 мм, а двигателях с $h \geqslant 160$ мм — не менее 2,5—3 мм.

В связи с округлениями результатов расчета необходимо просчитать ширину зубцов в двух сечениях b'_{z2} и b''_{z2} по окончательно принятым размерам паза:

$$b'_{z2} = \pi\frac{D_2 - 2\left(h_ш + h'_ш\right) - b_1}{Z_2} - b_1; \quad (6\text{-}79)$$

$$b''_{z2} = \pi\frac{D_2 - 2h_п + b_2}{Z_2} - b_2. \quad (6\text{-}80)$$

При небольшом расхождении размеров b'_{z2} и b''_{z2} в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца $b_{z2} = (b'_{z2} + b''_{z2})/2$. При заметных расхождениях — расчет проводят так же, как для трапецеидальных зубцов ротора (см. ниже).

Расчетная высота зубца принимается равной:

$$h_{z2} = h_{п2} - 0{,}1\, b_2. \quad (6\text{-}81)$$

В двигателях с высотой оси вращения $h=280 \div 355$ мм выполняют закрытые пазы ротора: при $2p \geqslant 4$ — трапецеидальные, сужающиеся в верхней части (рис. 6-28) и при $2p=2$ — лопаточные (рис. 6-29).

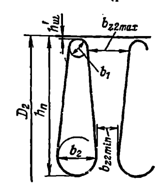


Рис. 6-28. Трапецеидальные пазы короткозамкнутого ротора.

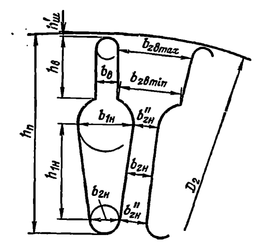


Рис. 6-29. Лопаточные пазы короткозамкнутого ротора.

Для расчета размеров трапецеидальных сужающихся в верхней части пазов целесообразно использовать графоаналитический метод, аналогичный описанному в § 6-5 для пазов всыпной обмотки статора. Наименьшая допустимая ширина зубца b_{z2min} находится по B_{z2max} (см. табл. 6-10). На построенном в достаточно большом масштабе эскизе зубцового деления ротора, изменяя b_2 и $h_п$, графически определяют размеры паза по заданной площади сечения стержня q_c, при которых B_{z2max} остается в допустимых пределах. Высота перемычки над пазом принимается равной $h'_ш=0{,}5$ мм. Диаметр закругления верхней части паза должен быть не менее $b_1 \geqslant 3{,}5 \div 4$ мм. После построения определяется ширина зубца ротора:

$$b_{z2max} = \pi \frac{D_2 - (2h'_ш + b_1)}{Z_2} - b_1; \quad (6\text{-}82)$$

$$b_{z2min} = \pi \frac{D_2 - (2h_п - b_2)}{Z_2} - b_2. \quad (6\text{-}83)$$

Расчетная высота зубца

$$h_{z2} = h_п - 0{,}1\, b_2. \quad (6\text{-}84)$$

В лопаточных пазах (рис. 6-29) высота верхней части паза $h_в$ для получения наибольшего эффекта вытеснения тока во время пуска при литой алюминиевой обмотке выполняется равной 15—16 мм. Размеры нижней части лопаточных стержней рассчитывают, исходя из сечения стержня q_c и постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_{1н} = \frac{\pi\left(D_2 - 2h'_ш - 2h_в\right) - Z_2 b_{z2н}}{Z_2 + \pi}, \quad (6\text{-}85)$$

где $b_{z2н}$ — ширина зубца на нижнем участке, определяемая по допустимой индукции в зубцах ротора (см. табл. 6-10);

$h'_ш$ — высота перемычки над пазом. Для двигателей с $2p=2$ принимают $h'_ш = 1 \div 2$ мм.

Требуемое сечение нижней части стержня

$$q_{c.н} = q_c - q_{c.в}, \quad (6\text{-}86)$$

где сечение верхней части стержня

$$q_{c.в} = b_в\left(h_в - 0{,}11\, b_в\right). \quad (6\text{-}87)$$

Ширина верхней части стержня

$$b_в = (0{,}5 \div 0{,}65)\, b_{1н}.$$

Диаметр закругления нижней части стержня

$$b_{2н} = \sqrt{\frac{b_{1н}^2\left(\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}\right) - 4q_{c.н}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}. \quad (6\text{-}88)$$

Наименьший допустимый размер $b_{2н}=3 \div 4$ мм.

Если по (6-88) $b_{2н} < 3$ мм, следует или уменьшить сечение стержня (увеличить плотность тока в нем), или несколько увеличить индукцию в зубцах ротора.

Расстояние между центрами закруглений нижней части стержня

$$h_{1н} = (b_{1н} - b_{2н}) \frac{Z_2}{2\pi}. \qquad (6\text{-}89)$$

После округления полученных размеров до десятых долей миллиметра уточняется площадь сечения стержня ротора: $q_{с,в}$ по (6-87) и

$$q_{с,н} = \frac{\pi}{8} (b_{1н}^2 + b_{2н}^2) + $$

$$+ (b_{1н} + b_{2н}) \frac{h_{1н}}{2}; \qquad (6\text{-}90)$$

$$q_с = q_{с,в} + q_{с,н}. \qquad (6\text{-}91)$$

Размеры зубцов в верхних и нижних частях рассчитывают раздельно.

Размеры верхней части зубца:

$$b_{zвmax} = \pi \frac{D_2 - (2h'_ш + b_в)}{Z_2} - b_в; \quad (6\text{-}92)$$

$$b_{zвmin} = \pi \frac{D_2 - 2h'_в}{Z_2} - b_в, \quad (6\text{-}93)$$

где $h'_в = h_в + h'_ш$.

Размеры нижней части зубца:

$$b''_{zн} = \pi \frac{D_2 - 2h'_в - b_{1н}}{Z_2} - b_{1н}; \quad (6\text{-}94)$$

$$b'_{zн} = \pi \frac{D_2 - (2h_п - b_{2н})}{Z_2} - b_{2н}. \quad (6\text{-}95)$$

Расчетная высота участков зубца:

верхнего

$$h_{zв} = h'_в; \qquad (6\text{-}96)$$

нижнего

$$h_{zн} = h_н - 0{,}1\, b_{2н}. \qquad (6\text{-}97)$$

В короткозамкнутых роторах с обмоткой из вставных алюминиевых шин выполняют открытые прямоугольные пазы (рис. 6-30). Размеры паза находятся, исходя из допустимой ширины зубца b_{z2min}, определенной по допустимой B_{z2max} (табл. 6-10). Ширина паза

$$b_п = \frac{(t_2 - b_{z2min}) \pm \sqrt{(t_2 - b_{z2min})^2 - S_{п2} \frac{8\pi}{Z_2}}}{2}, \qquad (6\text{-}98)$$

где $S_{п2}$ — полная площадь поперечного сечения паза, которую предварительно берут равной:

$$S_{п2} \approx 1{,}1\, q_с. \qquad (6\text{-}99)$$

Из двух возможных значений $b_п$, полученных по (6-98), следует выбрать удовлетворяющее требовани-

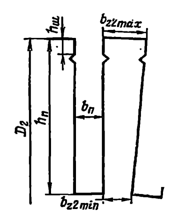


Рис. 6-30. Прямоугольные пазы короткозамкнутого ротора с обмоткой из алюминиевых шин.

ям конструкции. Ширина алюминиевой шины должна быть меньше ширины паза в штампе на припуск на сборку сердечника $\Delta b_п$ (см. § 3-5). Размеры паза окончательно определяют после выбора стандартного сечения и размеров алюминиевой шины (табл. П-33).

Высота паза

$$h_п = h_с + \Delta h_п + h_ш, \quad (6\text{-}100)$$

где $\Delta h_п$ — по табл. 6-12;

$h_ш$ — высота шлица, в роторах такой конструкции выполняется равной 4 мм.

Наибольшая и наименьшая ширина зубцов при прямоугольных пазах ротора определяется по (6-63) и (6-65). Расчетная высота зубца принимается равной высоте паза:

$$h_z = h_п.$$

в) Сердечники роторов

Сердечники роторов асинхронных двигателей при $D_2 < 990$ мм выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения $h_2 \leqslant 250$ мм применяют горячую посадку сердечников на гладкий

вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Если диаметр ротора превышает 990 мм, то сердечник шихтуют из отдельных сегментов (см. гл. 9) и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах, приваренных к валу (оребренные валы).

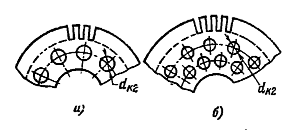


Рис. 6-31. Аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора.

В большинстве двигателей с высотой оси вращения $h \geqslant 250$ мм выполняют аксиальные каналы с целью некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции. В двигателях серии 4А при $h=250$ мм аксиальные каналы располагают в одном ряду (рис. 6-31, *а*), их число $m_{к2}=10$, а диаметр $d_{к2}=15 \div 30$ мм. В двигателях с высотой оси вращения $h=280 \div 355$ мм в одном ряду располагают 12 каналов диаметром $d_{к2}=20 \div 30$ мм. В двигателях с $h>355$ мм число каналов уменьшают до 9, а диаметр увеличивают до 55—100 мм. Во всех перечисленных примерах бóльшие значения $d_{к2}$ относятся к двигателям с большим числом $2p$. Аксиальные каналы могут быть расположены в одном ряду или при больших диаметрах ротора в двух рядах (рис. 6-31, *б*).

Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняются лишь при длине сердечника, превышающей 0,25—0,3 м. В таких роторах необходимо предусматривать выполнение также и аксиальных каналов, которые служат для прохода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние на магнитное напряжение ярма ротора и должны быть учтены при расчете магнитной цепи.

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала $D_в$ и может быть определен по формуле

$$D_в \approx k_в D_a. \qquad (6\text{-}101)$$

Значение коэффициента $k_в$ даны в табл. 6-16.

Таблица 6-16

Коэффициенты $k_в$ для расчета диаметра вала асинхронных двигателей

h, мм	50—63	71—250	280—355		400—500		
$2p$	2—6	2—8	2	4—12	4	6	8—12
$k_в$	0,19	0,23	0,22	0,23	0,20	0,23	0,25

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то внутренний диаметр D_j, м, определяется, исходя из допустимой индукции в ярме ротора, с использованием следующих выражений:

$$h_j = \frac{\Phi}{2B_j \, l_{ст2} k_c}; \qquad (6\text{-}102)$$

$$D_j = D_2 - 2(h_{п2} + h_j). \qquad (6\text{-}103)$$

6-8. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Как было отмечено в гл. 4, насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре (рис. 6-32). Пересечение реальной (уплощенной) кривой поля *2* в зазоре с основной гармонической *1* происходит в точках, отстоящих от оси симметрии одного полупериода кривой на угол $\psi \approx 35°$. Поэтому за расчетную индукцию принимается не амплитудное значение, а $B_{расч} = B_{max} \cos \psi \approx \approx 0,82 \; B_{max}$. По $B_{расч}$ следует определить $H_{расч}$ по основной кривой намагничивания и увеличить затем результат в $k=1/0,82$ раз, приводя напряженность к амплитудному значению индукции. Для воздушного зазора, имеющего линейную зависимость $H=f(B)$, эта операция равно-

сильна непосредственному определению магнитного напряжения зазора по B_δ. При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для

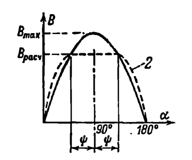


Рис. 6-32. Кривые индукции в воздушном зазоре асинхронной машины.

1 — синусоида; *2* — уплощенная кривая.

зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают $\alpha_\delta = 2/\pi$ и $k_в = 1,11$.

Расчет магнитной цепи проводится в нижеследующей последовательности.

Используя рассчитанные по (6-22) и (6-23) соответственно поток полюса и индукцию в воздушном зазоре, находят индукцию в зубцах статора и ротора:

$$B_{z1(2)} = \frac{B_\delta t_{1(2)} l_\delta}{b_{z1(2)} l_{ст1(2)} k_с}. \quad (6\text{-}104)$$

При переменном сечении зубцов рассчитывают либо три значения индукции B_{zmax}, B_{zmin} и $B_{zср}$ соответственно в наибольшем, наименьшем и среднем сечении зубца либо индукцию $B_{z1/3}$ в сечении на расстоянии 1/3 высоты от узкой части зубца. Расчетную ширину зубцов определяют по формулам, приведенным в § 6-5 и 6-7, в зависимости от конфигурации пазов.

Расчетные размеры зубцов короткозамкнутых роторов с фигурными пазами отличной от рассмотренных в § 6-7 конфигурации (рис. 6-33), а также зубцов двухклеточных роторов (рис. 6-34) могут быть определены по формулам табл. 6-17 и 6-18.

Если расчетная индукция в каком-либо сечении зубца превышает 1,8 Тл, необходимо учесть поток в пазу. Действительную индукцию в этом сечении зубца определяют по методу, изложенному в § 4-1.

Таблица 6-17

Размеры зубцов роторов асинхронных двигателей с фигурными пазами

Размер	Рис. 6-33, *а*	Рис. 6-33, *б*	Рис. 6-33, *в*	Рис. 6-33, *г*
$b_{zвmax}$	$\pi\frac{D_2-2h_ш}{Z_2}-b_в$	$\pi\frac{D_2-(2h_ш+b_в)}{Z_2}-b_в$	$\pi\frac{D_2-(2h_ш+b_в)}{Z_2}-b_в$	$\pi\frac{D_2-2\left(h_ш+\frac{d}{3}\right)}{Z_2}-0,94d$
$b_{zвmin}$	$\pi\frac{D_2-2h_в'}{Z_2}-b_в$	$\pi\frac{D_2-2h_в'}{Z_2}-b_в$	$\pi\frac{D_2-2h_в'}{Z_2}-b_в$	
$h_{zв}$	$h_в'$	$h_в'$	$h_в'$	$0,9d+h_ш$
$b_{zнmax}$	$\pi\frac{D_2-h_в'}{Z_2}-b_н$	$\pi\frac{D_2-2h_в'}{Z_2}-b_н = \pi\frac{D_2-(2h_п-b_н)}{Z_2}-b_н$	$\pi\frac{D_2-2\left(h_в+\frac{1}{3}b_н\right)}{Z_2}-0,94b_н$	—
$b_{zнmin}$	$\pi\frac{D_2-2h_п}{Z_2}-b_н$			
$b_{zн}$	$h_н$	$h_н-0,1b_н$	$0,9b_н$	—

Таблица 6-18

Размеры зубцов двойной клетки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей

Размер	Рис. 6-34, *а*	Рис. 6-34, *б*	Рис. 6-34, *в*
$b_{zв.ср}$	$\dfrac{D_2-2\left(h_ш+\frac{1}{3}b_в\right)}{Z_2}-0,94\,b_в$		
$h_{zв}$	$h'_в-0,1b_в$		
$b_{zн\,max}$	—	$\pi\dfrac{D_2-2(h'_в+h_0)}{Z_2}-b_н$	—
$b_{zн\,min}$	—	$\pi\dfrac{D_2-2h}{Z_2}-b_н$	—
$b_{zн.ср}$	$\pi\dfrac{D_2-2\left(h'_п+h_0+1/3b_н\right)}{Z_2}-0,94b_н$	$\dfrac{b_{zн\,max}+b_{zн\,min}}{2}$	$\pi\dfrac{D_2-(2h-b_{н2})}{Z_2}-b_{н2}$
$h_{zн}$	$0,9b_н$	$h'_н-h_0$	$h'_н-h_0-1,0b_{н2}$

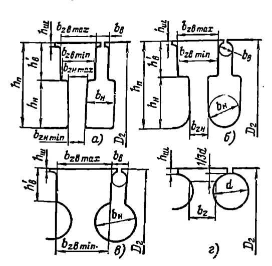


Рис. 6-33. Фигурные пазы короткозамкнутых роторов.

Индукция в ярме статора B_a, Тл,

$$B_a=\frac{\Phi}{2h'_a\,l_{ст1}\,k_c},\qquad (6\text{-}105)$$

где h'_a — расчетная высота ярма статора, м:

$$h'_a=\frac{D_a-D}{2}-h_{п1}-\frac{2}{3}d_{к1}\,m_{к1},\qquad (6\text{-}106)$$

где $d_{к1}$ и $m_{к1}$ — диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в статоре. При отсутствии каналов $m_{к1}=0$.

Индукция в ярме ротора B_j, Тл,

$$B_j=\frac{\Phi}{2h'_j\,l_{ст2}\,k_c},\qquad (6\text{-}107)$$

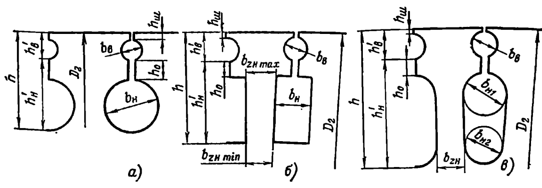


Рис. 6-34. Пазы двухклеточных роторов.

где h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

При этом для роторов с посадкой сердечника на втулку или на оребренный вал (крупные асинхронные машины) расчетная высота ярма ротора

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2}, \quad (6\text{-}108)$$

где $d_{к2}$ — диаметр аксиальных каналов ротора;

$m_{к2}$ — число рядов аксиальных каналов.

При посадке сердечника непосредственно на вал в двигателях с $2p=2$ и 4 необходимо учитывать, что часть магнитных линий потока замыкается через вал. При этом расчетная высота ярма ротора

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{п2}\right) - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2}. \quad (6\text{-}109)$$

Для двигателей с $2p \geqslant 6$ с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал h'_j определяют по (6-108):

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta = 1{,}59 B_\delta \delta k_\delta \cdot 10^6. \quad (6\text{-}110)$$

В этой формуле k_δ — коэффициент воздушного зазора по (4-14); δ — воздушный зазор, м; $\mu_0 = 4\pi \times \times 10^{-7}$ Гн/м.

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора, А,

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1}, \quad (6\text{-}111)$$

где h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м.

При переменном сечении зубцов

$$H_{z1} = (H_{z1max} + H_{z1min} + 4H_{z1ср})/6 \quad (6\text{-}112)$$

или $H_{z1} = H_{z1/3}$.

Значения напряженности поля в зубцах H_z, А/м, находят в соответствии с индукциями B_z по кривой намагничивания для зубцов для принятой марки стали (см. приложение II).

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора, А,

$$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2}, \quad (6\text{-}113)$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца, м.

При переменном и плавно изменяющемся сечении зубца

$$H_{z2} = (H_{z2max} + H_{z2min} + 4H_{z2ср})/6 \quad (6\text{-}114)$$

или

$$H_{z2} = H_{z1/3}. \quad (6\text{-}115)$$

Значения H, А/м, определяются по кривой намагничивания для зубцов для принятой марки стали (см. приложение II).

Если при расчете зубцов с переменным сечением $H_{z1max}/H_{zmin} > > 2$, то необходимо подразделить зубец по высоте на две равные части и определить напряженности в каждой из них в отдельности. В этом случае расчетная ширина зубца берется на высоте 0,2 и 0,7 всей высоты зубца от его наиболее узкой части:

$$b_{z0,2} = b_{zmin} + 0{,}2(b_{zmax} - b_{zmin}); \quad (6\text{-}116)$$

$$b_{z0,7} = b_{zmin} + 0{,}7(b_{zmax} - b_{zmin}). \quad (6\text{-}117)$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны

$$F_{z2} = h_{z2}(H_{z0,2} + H_{z0,7}). \quad (6\text{-}118)$$

При фигурных пазах ротора или двойной беличьей клетке рассчитываются раздельно магнитные напряжения верхней ($F_{z2в}$) и нижней ($F_{z2н}$) частей зубцов (см. табл. 6-17 и 6-18).

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора в этих случаях равно:

$$F_{z2} = 2(F_{z2в} + F_{z2н}). \quad (6\text{-}119)$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}. \quad (6\text{-}120)$$

Полученное значение k_z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины. Если $k_z > > 1{,}5 \div 1{,}6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_z < 1{,}2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих

случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

Магнитное напряжение ярма статора, А,

$$F_a = L_a H_a, \quad (6\text{-}121)$$

где L_a — длина средней магнитной линии ярма статора, м:

$$L_a = \pi (D_a - h_a)/2p; \quad (6\text{-}122)$$

H_a — напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма принятой марки стали, А/м.

Магнитное напряжение ярма ротора, А,

$$F_j = L_j H_j, \quad (6\text{-}123)$$

где H_j — напряженность поля при индукции B_j по кривой намагничивания ярма для принятой марки стали, А/м;

L_j — длина средней магнитной линии потока в ярме ротора, м. Для всех двигателей, кроме двухполюсных с непосредственной посадкой на вал,

$$L_j = \frac{\pi (D_в + h_j)}{2p}, \quad (6\text{-}124)$$

где высота спинки ротора

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2}. \quad (6\text{-}125)$$

Для двигателей с $2p = 2$, сердечник ротора которых непосредственно насажен на вал, длина средней магнитной линии определяется по формуле

$$L_j = 2h_j. \quad (6\text{-}126)$$

Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины (на пару полюсов), А,

$$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j. \quad (6\text{-}127)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = F_ц / F_\delta. \quad (6\text{-}128)$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu \approx \frac{pF_ц}{0{,}9\, m_1 w_1 k_{об1}}. \quad (6\text{-}129)$$

I_μ выражается также в процентах или долях номинального тока:

$$I_{\mu *} = I_\mu / I_{1н}. \quad (6\text{-}130)$$

Относительное значение I_μ служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя. Так, если при проектировании четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что $I_{\mu *} < 0{,}20 \div 0{,}18$, то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и $\cos\varphi$, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты.

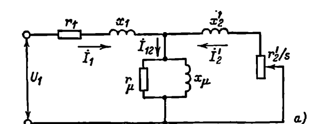
Если же в аналогичном двигателе $I_{\mu *} > 0{,}30 \div 0{,}35$, то это означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и $\cos\varphi$.

В небольших двигателях мощностью менее 2—3 кВт $I_{\mu *}$ может достигать значения 0,5—0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности.

6-9. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора x_1, r_1, ротора r_2, x_2, сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} (или r_μ), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рис. 6-35. Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отра-



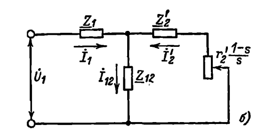


Рис. 6-35. Схемы замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины.

жаст схема, изображенная на рис. 6-35, *а*. Но для расчета оказалось удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рис. 6-35, *б*.

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2.

Увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2. При расчете рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

При расчете пусковых режимов, в которых токи машины в несколько раз превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, в большинстве случаев приходится учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

Рассмотрим расчет параметров схемы замещения для номинального режима асинхронных машин различных типов.

а) Активные сопротивления обмоток статора и фазного ротора

Активные сопротивления r_1 и r_2, Ом, определяются по основной расчетной формуле

$$r = k_r \rho_\vartheta \frac{L}{q_{эф} a}, \qquad (6\text{-}131)$$

где L — общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м;

$q_{эф}$ — сечение эффективного проводника, м²:

$$q_{эф} = q_{эл} n_{эл}; \qquad (6\text{-}132)$$

$q_{эл}$ — сечение элементарного проводника;

$n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном;

a — число параллельных ветвей обмотки;

ρ_ϑ — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м;

k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_r = 1$. Некоторое увеличение потерь, обусловленное действием эффекта вытеснения тока, относят к дополнительным потерям.

В обмотках фазных роторов k_r также принимают равным единице независимо от размеров и числа проводников в пазу, так как частота тока в них при номинальном и близких к нему режимах очень мала.

Общая длина проводников фазы обмотки L, м,

$$L = l_{ср} w, \qquad (6\text{-}133)$$

где $l_{ср}$ — средняя длина витка обмотки, м;

w — число витков фазы.

Среднюю длину витка $l_{ср}$ находят как сумму прямолинейных па-

зовых и изогнутых лобовых частей катушки

$$l_{ср} = 2(l_п + l_л). \qquad (6\text{-}134)$$

Длина пазовой части $l_п$ равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_п = l_{1(2)}.$$

Лобовая часть катушки имеет сложную конфигурацию (рис. 6-36).

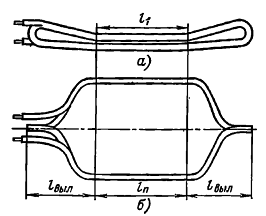


Рис. 6-36. Катушка двухслойной обмотки статора. Общий вид.

Точный расчет ее длины и длины вылета лобовой части требует предварительного определения всех размеров катушки и сопряжен со значительным объемом расчетов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчете обычно не используются. Для машин малой и средней мощности и в большинстве случаев для крупных машин достаточно точные для практических расчетов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

Катушки всыпной обмотки статора. Длина лобовой части, м,

$$l_л = K_л b_{кт} + 2B; \qquad (6\text{-}135)$$

вылет лобовых частей обмотки, м,

$$l_{выл} = K_{выл} b_{кт} + B. \qquad (6\text{-}136)$$

В этих формулах $b_{кт}$ — средняя ширина катушки, м, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{кт} = \frac{\pi(D + h_{п1})}{2p}\beta_1; \qquad (6\text{-}137)$$

Таблица 6-19

К расчету размеров лобовых частей катушек всыпной обмотки

Число полюсов $2p$	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	$K_л$	$K_{выл}$	$K_л$	$K_{выл}$
2	1,20	0,26	1,45	0,44
4	1,30	0,40	1,55	0,50
6	1,40	0,50	1,75	0,62
≥8	1,50	0,50	1,90	0,72

β_1 — относительное укорочение шага обмотки статора. Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для однослойных обмоток, включая обмотки из концентрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta = 1$; $K_л$ и $K_{выл}$ — коэффициенты, значения которых берут из табл. 6-19 в зависимости от числа полюсов машины и наличия изоляции в лобовых частях; B — длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м.

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B = 0{,}01$ м. В машинах, обмотки которых укладывают после запрессовки сердечника в корпус, вылет прямолинейной части $B = 0{,}015$ м.

Катушки из прямоугольного провода. В обмотках статоров и фазных роторов асинхронных двигателей, выполненных из прямоугольного провода, длина лобовой части витка, м,

$$l_л = K_л b_{кт} + 2B + h_п; \qquad (6\text{-}138)$$

вылет лобовой части обмотки, м,

$$l_{выл} = K_{выл} b_{кт} + B + 0{,}5 h_п, \qquad (6\text{-}139)$$

где $b_{кт}$ — средняя ширина катушки; для катушек статора рассчитывается по (6-137); для катушек ротора

$$b_{кт} = \frac{\pi(D_2 - h_{п2})}{2p}\beta_2; \qquad (6\text{-}140)$$

B — вылет прямолинейной части катушек из паза (по табл. 6-20);

Таблица 6-20

К расчету размеров лобовых частей катушек из прямоугольного провода

Напряжение $U_п$, В	S, м	B, м
⩽660	0 0035	0,025
3000—3300	0,005—0,006	0,035—0,04
6000—6600	0,006—0,007	0,035—0,05
⩾10 000	0,007—0,008	0,06—0,065

Примечание. Меньшие значения для катушек с непрерывной изоляцией.

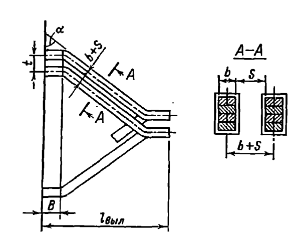


Рис. 6-37. Размеры лобовой части катушки.

$K_л$, $K_{выл}$ — коэффициенты, определяемые из выражений

$$K_л = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}}; \quad (6\text{-}141)$$

$$K_{выл} = \frac{1}{2} K_л m, \quad (6\text{-}142)$$

в которых (рис. 6-37)

$$m = \sin\alpha = (b+S)/t; \quad (6\text{-}143)$$

b — ширина меди катушки в лобовой части, м;

S — допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек (по табл. 6-20), м;

t — зубцовое деление, м.

Стержневая волновая обмотка фазных роторов асинхронных двигателей. Длина лобовых частей стержня ротора, м,

$$l_л = K_л b_{кт} + 2B_c; \quad (6\text{-}144)$$

вылет лобовой части, м,

$$l_{выл} = K_{выл} b_{кт} + B_c, \quad (6\text{-}145)$$

где $b_{кт}$ — среднее расстояние между сторонами последовательно соединенных стержней:

$$b_{кт} = \pi (D_2 - h_{п2})/2p; \quad (6\text{-}146)$$

B_c — сумма прямолинейных участков лобовой части стержня; длины вылета из паза и длины конца стержня в месте установки хомутиков, соединяющих стержни друг с другом. Обычно принимают $B_c = 0{,}05 \div 0{,}10$ м (большие значения для машин большей мощности и напряжения). Для высоковольтных асинхронных двигателей мощностью 800—1000 кВт и более берут $B_c = 0{,}12 \div 0{,}16$ м.

Коэффициенты $K_л$ и $K_{выл}$ находят соответственно по формулам (6-141) и (6-142), в которых

$$m_c = (b_2 + S_2)/t'_2, \quad (6\text{-}147)$$

где S_2 — расстояние между медью соседних стержней в лобовых частях, м (S_2 принимают в соответствии с табл. 6-21 в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора при неподвижной машине);

b_2 — ширина меди стержня ротора, м;

t'_2 — зубцовое деление по дну пазов, м:

$$t'_2 = \pi (D_2 - 2h_{п2})/z_2. \quad (6\text{-}148)$$

Таблица 6-21

К расчету размеров лобовой части стержней фазных роторов асинхронных двигателей

$U_к$, В	до 500	500—1000	1000—1500	1500—2000
S_2, м	0,0017	0,002	0,0026	0,0029

После расчета $l_л$ определяют среднюю длину витка, образованного двумя стержнями ротора, м,

$$l_{ср} = 2(l_п + l_л)$$

и длину всех стержней фазы обмотки по (6-133).

Активное сопротивление фазы ротора r_2 определяют по (6-131). Для дальнейших расчетов r_2 долж-

но быть приведено к числу витков первичной обмотки

$$r_2' = \nu_{12} r_2, \qquad (6\text{-}149)$$

где коэффициент приведения сопротивлений

$$\nu_{12} = \frac{m_1 (w_1 k_{об1})^2}{m_2 (w_2 k_{об2})^2}. \qquad (6\text{-}150)$$

б) Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами

Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами рассчитывают по (4-42):

$$x = 15{,}8 \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_п + \lambda_л + \lambda_д).$$

Входящие в эту формулу коэффициенты магнитной проводимости обмоток асинхронных машин определяют следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_п$ рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 6-22, в зависимости от конфигурации паза и расположения в нем проводников обмотки. В этих формулах значения коэффициентов k_β и k_β' определяют в зависимости от шага обмотки.

При диаметральном шаге двухслойных обмоток и для всех однослойных обмоток

$$k_\beta = k_\beta' = 1.$$

При двухслойной обмотке с укорочением $2/3 \leqslant \beta < 1$

$$k_\beta' = 0{,}25\,(1 + 3\beta); \qquad (6\text{-}151)$$

при укорочении $1/3 \leqslant \beta \leqslant 2/3$

$$k_\beta' = 0{,}25\,(6\beta - 1); \qquad (6\text{-}152)$$

коэффициент

$$k_\beta = 0{,}25\,(1 + 3k_\beta'). \qquad (6\text{-}153)$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_л = 0{,}34 \frac{q}{l_\delta'} (l_л - 0{,}64\,\beta\tau), \qquad (6\text{-}154)$$

где q, $l_л$ и β — число пазов на полюс и фазу, длина лобовой части катушки и относительное укорочение шага обмотки, для которой производится расчет, т. е. обмотки статора или фазного ротора.

Для одно-двухслойных обмоток β находится по (3-17) или (3-18).

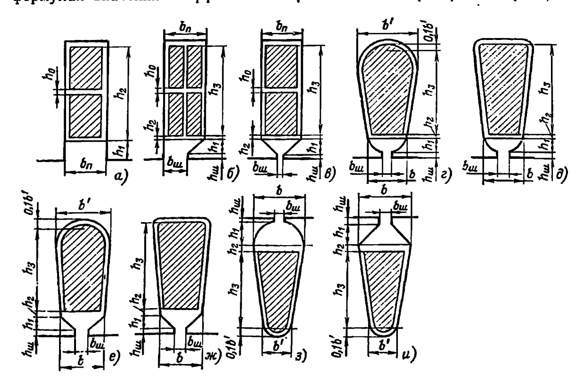


Рис. 6-38. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазов статора

Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток $\lambda_п$

Рисунок	Тип обмотки	Расчетные формулы
6-38, *а*	Двухслойная	$\frac{h_2-h_0}{3b_п}k_\beta+\frac{h_1}{b_п}k'_\beta+\frac{h_0}{4b_п}$
	Однослойная	$\frac{h_2}{3b_п}+\frac{h_1}{b_п}$
6-38, *б*	Двухслойная	$\frac{h_3-h_0}{3b_п}k_\beta+\left(\frac{h_2}{b_п}+\frac{3h_1}{b_п+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)k'_\beta$
6-38, *в*	Двухслойная	$\frac{h_3-h_0}{3b_п}k_\beta+\left(\frac{h_2}{b_п}+\frac{3h_1}{b_п+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)k'_\beta$
	Однослойная	$\frac{h_3}{3b_п}+\frac{h_2}{b_п}+\frac{3h_1}{b_п+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-38, *г*, *д*, *з*	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_3}{3b}k_\beta+\left(0{,}785-\frac{b_ш}{2b}+\frac{h_2}{b}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)k'_\beta$
6-38, *е*, *ж*, *и*	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_3}{3b}k_\beta+\left(\frac{h_2}{b}+\frac{3h_1}{b+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}\right)k'_\beta$

При наличии радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора

$$l'_\delta=l_1-0{,}5n_к b_к \qquad (6\text{-}155)$$

и для обмотки ротора

$$l'_\delta=l_2-0{,}5n_к b_к. \qquad (6\text{-}156)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_д=\frac{t}{12\delta k_\delta}\xi. \qquad (6\text{-}157)$$

Значение коэффицинта ξ зависит от числа q, укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

Ниже приводятся формулы, в которые при расчете ξ для обмоток статора или ротора следует подставлять данные обмоток и зубцовых зон соответственно статора или ротора.

Для обмоток статора и ротора при q, выраженном целым числом ($q\geqslant2$), для обмотки с диаметральным шагом

$$\xi=2+0{,}022q^2-k^2_{об}(1+\Delta_z); \qquad (6\text{-}158)$$

при укороченном шаге обмотки $y=\beta\tau$

$$\xi=k''q^2+2k'_\beta-k^2_{об}(1+\Delta_z); \qquad (6\text{-}159)$$

при дробном $q\geqslant2$

$$\xi=k''q^2+2k''_\beta-k_{об}\left(\frac{1}{d^2}+\Delta_z\right); \qquad (6\text{-}160)$$

при дробном q, значение которого $1<q<2$,

$$\xi=k''q^2+2k''_\beta-\frac{k'}{q}-k_{об}\left(\frac{1}{d^2}+\Delta_z\right). \qquad (6\text{-}161)$$

В этих формулах коэффициенты Δ_z, k', k'' и k''_β определяются по кривым, приведенным на рис. 6-39. Для определения k''_β и k' необходимо найти дробную часть числа q, равную c/d (дробное число $q=b+c/d$, где b — целое число, $c/d<1$ — дробная часть числа q). Коэффициент k'_β — по (6-151) или (6-152).

Индуктивное сопротивление обмотки фазного ротора, определенное по (4-42), должно быть приведено к числу витков обмотки статора:

$$x'_2=\nu_{12}x_2, \qquad (6\text{-}162)$$

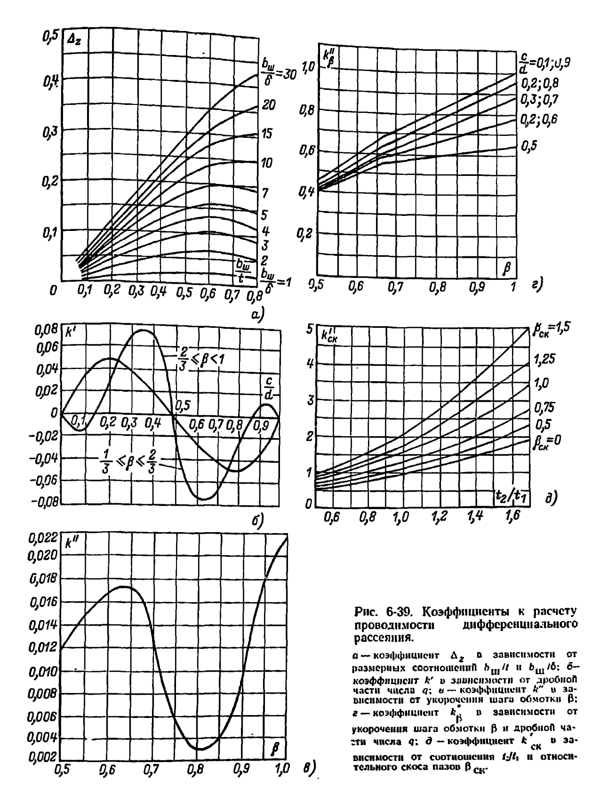


Рис. 6-39. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния.

а — коэффициент Δ_z в зависимости от размерных соотношений $b_ш/t$ и $b_ш/\delta$; б — коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q; в — коэффициент k'' в зависимости от укорочения шага обмотки β; г — коэффициент k''_β в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q; д — коэффициент $k'_{ск}$ в зависимости от соотношения t_2/t_1 и относительного скоса пазов $\beta_{ск}$.

где ν_{12} — коэффициент приведения сопротивлений по (6-150).

в) Сопротивления обмоток двигателей с короткозамкнутыми роторами

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается так же, как и для двигателя с фазным ротором.

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. Как говорилось выше, за фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец (см. рис. 6-24). Токи в стержнях и замы-

кающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным, полученным из условия равенства электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока $I_с$ и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец реальной машины:

$$I_с^2 r_2 = I_с^2 r_с + 2I_{кл}^2 r_{кл}, \quad (6\text{-}163)$$

где $I_с$ — ток в стержне ротора;
$I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах;
$r_с$ — сопротивление стержня;
$r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями (см. рис. 6-24).

Ток $I_с$ называют током ротора и в расчетах обозначают I_2.

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_с/\Delta = I_2/\Delta,$$

где $\Delta = 2\sin\frac{\pi p}{z_2}$ (см. § 6-7), из (6-163) получаем:

$$r_2 = r_с + 2\frac{r_{кл}}{\Delta^2}, \quad (6\text{-}164)$$

где

$$r_с = \rho_с \frac{l_с}{q_с} k_r; \quad (6\text{-}165)$$

$$r_{кл} = \rho_{кл} \frac{\pi D_{кл.ср}}{Z_2 q_{кл}}. \quad (6\text{-}166)$$

В этих выражениях $l_с$ — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м;

$D_{кл.ср}$ — средний диаметр замыкающих колец, м (см. рис. 6-26):

$$D_{кл.ср} = D_2 - b_{кл}; \quad (6\text{-}167)$$

$q_с$ — сечение стержня, м²;
k_r — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r = 1$;
$q_{кл}$ — площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м²;
$\rho_с$ и $\rho_{кл}$ — соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец, Ом·м, при расчетной температуре (см. табл. 4-1).

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Выражение коэффициента приведения для сопротивления фазы короткозамкнутого ротора получают, подставляя в (6-150) значения $m_2 = Z_2$, $w_2 = 1/2$ и $k_{об2} = 1$:

$$\nu_{12} = 4m_1 \frac{(w_1 k_{об1})^2}{Z_2}; \quad (6\text{-}168)$$

тогда

$$r_2' = r_2 \frac{4m_1 (w_1 k_{об1})^2}{Z_2}. \quad (6\text{-}169)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается по той же формуле, что и для статоров с фазными роторами, т. е.

$$x_1 = 15{,}8\frac{f}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta'}{pq}(\lambda_п + \lambda_л + \lambda_д).$$

Входящие в формулу коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_п$ определяются в зависимости от конфигурации пазов по формулам табл. 6-22.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния $\lambda_л$ определяется по (6-154).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д1}$ определяют по формуле

$$\lambda_{д1} = \frac{t_1}{12\delta k_\delta}\xi, \quad (6\text{-}170)$$

в которой ξ находится следующим образом:

При открытых пазах статора и отсутствии скоса пазов статора или ротора

$$\xi = \left(2\frac{t_2}{t_1} - \frac{t_1}{t_2}\Delta_z\right)k_\beta - k_{об1}^2\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2. \quad (6\text{-}171)$$

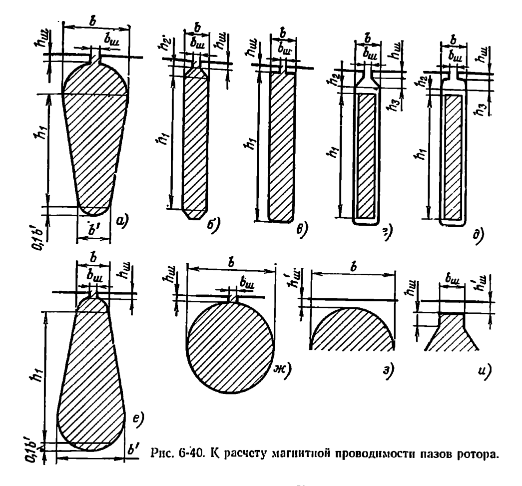


Рис. 6-40. К расчету магнитной проводимости пазов ротора.

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2k'_{ск} k_{\beta} - k^2_{об1}\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 (1+\beta^2_{ск}). \quad (6\text{-}172)$$

В этих формулах t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора;

Δ_z определяют по кривой рис. 6-39, *а*; k_{β} определяют по (6-153);

$\beta_{ск} = b_{ск}/t_2$ — коэффициент скоса, выраженный в долях зубцового деления ротора. При отсутствии скоса пазов $b_{ск}=0$; $k'_{ск}$ определяют по кривым рис. 6-39, *д* в зависимости от t_2/t_1 и $\beta_{ск}$ (при отсутствии скоса пазов — по кривой, соответствующей $\beta_{ск}=0$).

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле (4-42) или по формуле

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l'_{\delta} \cdot 10^{-6} (\lambda_п + \lambda_л + \lambda_д), \quad (6\text{-}173)$$

полученной после подстановки в (4-12) значений $m_2 = Z_2$ и $q_2 = 1/2p$ обмотки короткозамкнутого ротора.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора рассчитывают по приведенным в табл. 6-23 формулам в зависимости от конфигурации паза ротора на рис. 6-40.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12\delta k_{\delta}} \xi, \quad (6\text{-}174)$$

где

$$\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_z}{1-(p/Z_2)^2}; \quad (6\text{-}175)$$

Δ_z находят по кривым рис. 6-39, *а*.

Как видно из (6-175), при большом числе пазов ротора, приходящихся на пару полюсов, $Z_2/p \geqslant 10$ без заметной погрешности можно принять $\xi = 1 - \Delta_z$.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывают в зависимости от размеров и расположения замыкающих ко-

Таблица 6-23

Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчетные формулы
6-40, *а*	$\left[\frac{h_1}{3b}\left(1-\frac{\pi b^2}{8q_c}\right)^2+0{,}66-\frac{b_ш}{2b}\right]k_д+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *б*	$\left(\frac{h_1}{3b}+\frac{3h_2}{b+2b_ш}\right)k_д+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *в*	$\frac{h_1}{3b}k_д+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *г*	$\frac{h_1}{3b}k_д+\frac{h_2}{b}+\frac{2h_2}{b+2b_ш}+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *д*	$\frac{h_1}{3b}k_д+\frac{h_2}{b}+0{,}785-\frac{b_ш}{2b}+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *е*	$\left[\frac{h_1}{3b}\left(1-\frac{\pi b^2}{8q_c}\right)^2+0.66-\frac{b_ш}{2b}\right]k_д+\frac{h_ш}{b_ш}$
6-40, *ж*	$\left(0{,}785-\frac{b_ш}{2b}\right)k_д+\frac{h_ш}{b_ш}$

Примечания: 1. Для номинального режима $k_д = 1$.

2. Для закрытых пазов по рис. 6-40, *з* и *и* во всех расчетных формулах вместо слагаемого $h_ш/b_ш$ подставлять для пазов по рис. 6-40, *з* $0.3+1.12\frac{h'_ш}{I_2}10^6$ и по рис. 6-40, *и* $\frac{h_ш}{b_ш}+1.12\frac{h'_ш}{I_2}10^6$, где $h'_ш$ — толщина перемычки над пазом, м; I_2 — ток ротора, А.

лец короткозамкнутой обмотки по следующим формулам.

В роторах с литыми обмотками при замыкающих кольцах, прилегающих к торцам сердечника ротора (см. рис. 6-26, *б*), используют формулу

$$\lambda_{л2}=\frac{2{,}3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_δ \Delta^2}\lg\frac{4{,}7D_{кл.ср}}{2a_{кл}+b_{кл}}. \quad (6\text{-}176)$$

Если замыкающие кольца отставлены от торцов сердечника ротора (см. рис. 6-26, *а*), как, например, в обмотке, выполненной из медных или латунных стержней, впаянных в замыкающие кольца, расчет проводят по формуле

$$\lambda_{л2}=\frac{2{,}3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_δ \Delta^2}\lg\frac{4{,}7D_{кл.ср}}{2(a_{кл}+b_{кл})}. \quad (6\text{-}177)$$

В этих формулах $D_{кл.ср}$ — средний диаметр замыкающих колец по (6-167);

$\Delta=2\sin\pi p/Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне;

$a_{кл}$ и $b_{кл}$ — средние высота и ширина колец (см. рис. 6-26); $l'_δ$ — по (6-156).

Приведенное к числу витков первичной обмотки индуктивное сопротивление рассеяния фазы ротора

$$x'_2=x_2\frac{4m(w_1k_{об1})^2}{Z_2}. \quad (6\text{-}178)$$

Сопротивление схемы замещения r_μ (см. рис. 6-35, *а*) является расчетным. Введением его в схему замещения учитывают влияние потерь в стали статора на процессы в асинхронной машине, поэтому значение сопротивления r_μ должно быть взято таким, чтобы выделяющаяся в нем активная мощность была бы равна мощности, затрачиваемой на потери в стали в реальной машине и отнесенной к одной фазе. Таким образом, $r_\mu=P_{ст}/mI^2_{0a}$, так как активные потери в стали определяются активной составляющей тока холостого хода I_{0a}. Из схемы замещения $r_\mu=E_1^2m_1/P_{ст}$, где $\dot{E}_1=\dot{U}_1-\dot{I}_1\underline{Z}_1$.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_μ по схеме замещения может быть определено как $x_\mu=E_1/I_\mu$.

В расчетной практике параллельное включение сопротивлений r_μ и x_μ оказалось удобнее заменить последовательно включенными сопротивлениями r_{12} и x_{12} (см. рис. 6-35, *б*), значения которых опреде-

ляют из условия

$$\underline{Z}_{12}=\underline{Z}_{\mu}=\frac{jr_{\mu}x_{\mu}}{r_{\mu}+jx_{\mu}}=r_{12}+jx_{12},$$

где

$$r_{12}=\frac{x_{\mu}^{2}r_{\mu}}{r_{\mu}^{2}+x_{\mu}^{2}} \text{ и } x_{12}=\frac{r_{\mu}^{2}x_{\mu}}{r_{\mu}^{2}+x_{\mu}^{2}}.$$

Так как в асинхронных машинах $r_{\mu}\gg x_{\mu}$, то $x_{12}\approx x_{\mu}$, а $r_{12}\ll x_{12}$. В связи с этим значение r_{12} не играет заметной роли при анализе процессов в машине и в расчетах им часто пренебрегают.

Сопротивления r_{12} и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12}=\frac{P_{\text{ст.осн}}}{mI_{\mu}^{2}}; \qquad (6\text{-}179)$$

$$x_{12}=\frac{U_{1н}-I_{\mu}x_{1}}{I_{\mu}}=\frac{U_{1н}}{I_{\mu}}-x_{1}. \qquad (6\text{-}180)$$

г) Относительные значения параметров

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчета характеристик параметры асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Значения параметров, выраженные в относительных единицах, будем отмечать звездочкой:

$$x_{1*}=x_{1}\frac{I_{1н}}{U_{1н}};\quad r_{1*}=r_{1}\frac{I_{1н}}{U_{1н}};$$

$$x_{12*}=x_{12}\frac{I_{1н}}{U_{н}};$$

$$x_{2*}'=x_{2}'\frac{I_{1н}}{U_{1н}};\quad r_{2*}'=r_{2}'\frac{I_{1н}}{U_{1н}};$$

$$r_{12*}=r_{12}\frac{I_{1н}}{U_{1н}}.$$

Относительные значения одних и тех же параметров схемы замещения различных асинхронных двигателей нормального исполнения незначительно отличаются друг от друга.

Так, относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора большей частью находятся в пределах $x_{1}=0{,}08\div0{,}14$ и $x_{2}'=0{,}1\div0{,}16$.

Относительные значения сопротивлений взаимной индукции, как правило, в 30—40 раз больше, чем x_{1*}. Обычно $x_{12*}=2\div4$.

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно составляют несколько сотых долей $r_{1*}\approx r_{2*}'\approx0{,}02\div0{,}03$; лишь в машинах малой мощности их значения несколько увеличиваются.

Сопротивление r_{12*} обычно составляет 0,05—0,2. Только в крупных двигателях его значение может превышать указанные пределы.

д) Учет скоса пазов

Скос пазов (см. § 3-5) уменьшает влияние высших гармонических и улучшает виброакустические характеристики двигателей, но при скошенных пазах несколько уменьшается ЭДС обмоток. В практических расчетах уменьшение ЭДС от скоса пазов непосредственно не определяют, а влияние скоса учитывают увеличением индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток статора и ротора. С этой целью в расчетные формулы (4-42) и (6-173) вводят коэффициент $\sigma_{ск}$. Индуктивное сопротивление обмоток при скошенных пазах

$$\left.\begin{aligned}x_{1ск}&=x_{1}\sigma_{ск};\\x_{2ск}&=x_{2}\sigma_{ск}.\end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}181)$$

Приближенное значение коэффициента $\sigma_{ск}$ можно найти по формуле

$$\sigma_{ск}\approx1+0{,}41\left(\frac{b_{ск}}{\tau}\right)^{2}\frac{U_{1н}}{I_{\mu}x_{1}}, \qquad (6\text{-}182)$$

где $b_{ск}$ — скос пазов в линейных размерах.

Скошенные пазы выполняют большей частью лишь в двигателях с короткозамкнутыми роторами с $h\leqslant160$ мм. При проектировании следует иметь в виду также отрицательные последствия применения скоса паза: из-за увеличения индуктивных сопротивлений рассеяния несколько уменьшается перегрузоч-

ная способность и пусковой момент двигателя. Поэтому скос обычно выбирают равным не более чем одному зубцовому делению ротора, т. е. $b_{ск} \leqslant t_2$. Лишь в машинах небольшой мощности иногда выполняют $b_{ск}=1{,}5\,t_2$ или $b_{ск}=2\,t_2$.

В серии 4А роторы всех двигателей с высотой оси вращения $h<$ <160 мм выполняют со скосом пазов на одно зубцовое деление ротора.

6-10. ПОТЕРИ И КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке. *Основные потери в стали* в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2=sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

В пусковых режимах f_2 близка к f_1 и потери в стали ротора соответственно возрастают, однако при расчете пусковых характеристик потери находят только для определения нагрева ротора за время пуска. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют в соответствии с (4-44) по следующей формуле:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50}\left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta}\left(k_{да} B_a^2 m_a + k_{дz} B_{zср}^2 m_{z1}\right), \qquad (6\text{-}183)$$

где β — показатель степени и $p_{1,0/50}$ — удельные потери, Вт/кг, по даниым [12] берут из табл. 6-24;

$k_{да}$ и $k_{дz}$ — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приближенно можно принять $k_{да}=1{,}6$ и $k_{дz}=1{,}8$; для машин большей мощности $k_{да}=1{,}4$ и $k_{дz}=$ $=1{,}7$.

Таблица 6-24

Удельные потери в стали асинхронных двигателей и значения β при толщине листов 0,5 мм

Марка стали	$p_{1,0/50}$, Вт/кг	β
2013, 2011, 2211	2.5—2,6	1,5
2312	1,75	1,4
2411	1,6	1,3

B_a и $B_{zср}$ — индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл;

m_a, m_{z1} — масса стали ярма и зубцов статора, кг:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)\,h_a\,l_{ст1}\,k_c\,\gamma_c; \qquad (6\text{-}184)$$

$$m_{z1} = h_{z1}\,b_{z1ср}\,Z_1\,l_{ст1}\,k_c\,\gamma_c; \qquad (6\text{-}185)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0{,}5(D_a - D) - h_{п1};$$

h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м;

$b_{z1ср}$ — средняя ширина зубца статора, м:

$$h_{z1ср} = \frac{b_{z1\,max} + b_{z1\,min}}{2};$$

γ_c — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c=7{,}8\cdot10^3$ кг/м³.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсации индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора, Тл,

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)}\,k_\delta\,B_\delta. \qquad (6\text{-}186)$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов

ротора к воздушному зазору $\beta_{01} = f(b_{ш2}/\delta)$; для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору $\beta_{02} = f(b_{ш1}/\delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_ш/\delta)$ приведена на рис. 6-41. По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной $Z_2 n$ для статора и $Z_1 n$ для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери,

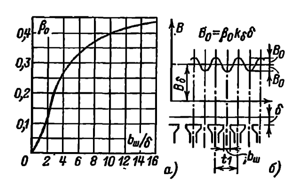


Рис. 6-41. К расчету поверхностных потерь в асинхронной машине.

а — зависимость $\beta_0 = f(b_ш/\delta)$; *б* — пульсации индукции в воздушном зазоре.

т. е. потери, приходящиеся на 1 м² поверхности головок зубцов статора и ротора:

для статора

$$p_{пов1} = 0{,}5k_{01}\left(\frac{Z_2 n}{10\,000}\right)^{1,5} \times (B_{01} t_2 \cdot 10^3)^2; \quad (6\text{-}187)$$

для ротора

$$p_{пов2} = 0{,}5\,k_{02}\left(\frac{Z_1 n}{10\,000}\right)^{1,5} \times (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2. \quad (6\text{-}188)$$

В этих выражениях $k_{01(2)}$ — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01} = 1{,}4 \div 1{,}8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160$ кВт) $k_{01(2)} = 1{,}7 \div 2{,}0$;

$n = n_c(1-s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{пов1} = p_{пов1}(t_1 - b_{ш1}) Z_1 l_{ст1}. \quad (6\text{-}189)$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{пов2} = p_{пов2}(t_2 - b_{ш2}) Z_2 l_{ст2}. \quad (6\text{-}190)$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{пул}$, Тл:

для зубцов статора

$$B_{пул1} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_1} B_{z1ср}; \quad (6\text{-}191)$$

для зубцов ротора

$$B_{пул2} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_2} B_{z2ср}. \quad (6\text{-}192)$$

В этих формулах $B_{z1ср}$ и $B_{z2ср}$ — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл;

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta}; \quad \gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta}. \quad (6\text{-}193)$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 в (6-193) вместо $b_{ш1}$ или $b_{ш2}$ подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную

$$b'_{ш1(2)} = \frac{b_{ш1(2)}}{3} \times \left(1 + \frac{0{,}5\,t_{1(2)}}{t_{1(2)}\,b_{ш1(2)} + \varkappa_\delta}\right) \quad (6\text{-}194)$$

индекс 1 — при расчете $b'_{ш1}$; индекс 2 — при расчете $b'_{ш2}$).

Значения коэффициента $\varkappa_\delta$ в зависимости от отношения $b_п/\delta$ для открытых пазов приведены на рис. 6-42.

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{пул1} \approx 0{,}11\left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{пул1}\right)^2 m_{z1}; \quad (6\text{-}195)$$

пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{пул2} \approx 0{,}11\left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{пул2}\right)^2 m_{z2}. \quad (6\text{-}196)$$

В этих формулах m_{z1} — масса зубцов стали, кг, определяется по (6-185);

m_{z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2ср} Z_2 l_{ст2} k_с \gamma_с, \quad (6\text{-}197)$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца ротора, м;

$b_{z2ср}$ — средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{z2ср} = (b_{z2\,max} + b_{z2\,min})/2.$$

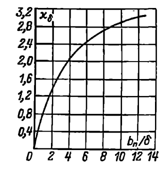


Рис. 6-42. К определению расчетной ширины шлица паза.

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно очень малы, так как в пазах таких роторов мало $b_{ш2}$ и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не производят.

Таким образом, добавочные потери в стали

$$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} \quad (6\text{-}198)$$

и общие потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб}. \quad (6\text{-}199)$$

Обычно $P_{ст.доб}$ — приблизительно на порядок меньше по сравнению с $P_{ст.осн}$.

Электрические потери в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (6\text{-}200)$$

Электрические потери во всех фазах обмотки фазного ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (6\text{-}201)$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2 \quad (6\text{-}202)$$

или

$$P_{э2} = m_1 I_1'^2 r_2'.$$

Электрические потери в щеточном контакте $P_{э.щ}$, Вт, фазных роторов асинхронных двигателей, не имеющих приспособлений для подъема щеток и замыкания накоротко контактных колец при номинальном режиме работы,

$$P_{э.щ} = m_2 \Delta U_щ I_{2к}, \quad (6\text{-}203)$$

где $\Delta U_щ$ — падение напряжения в скользящем контакте щетка — кольцо, В; для угольных и графитных щеток $\Delta U_щ = 1$ В; для металлоугольных и металлографитных щеток $\Delta U_щ = 0{,}3$ В; $I_{2к}$ — ток в кольце, А; при соединении обмотки ротора в звезду $I_{2к} = I_2$; при соединении обмотки ротора в треугольник (при $m_2 = 3$) $I_{2к} = \sqrt{3} I_2$.

Механические и вентиляционные потери. Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{мех} \approx K_т \left(\frac{n}{1000}\right)^2 (10D)^3; \quad (6\text{-}204)$$

$K_т = 5$ при $2p = 2$; $K_т = 6$ при $2p \geqslant 4$ для двигателей с $D_a \leqslant 0{,}25$ м;

$K_т = 6$ при $2p = 2$; $K_т = 7$ при $2p \geqslant 4$ для двигателей с $D_a > 0{,}25$ м.

В двигателях с внешним обдувом ($0{,}1 \leqslant D_a \leqslant 0{,}5$ м)

$$P_{мех} = K_т \left(\frac{n}{10}\right)^2 D_a^4; \quad (6\text{-}205)$$

$K_т = 1$ для двигателей с $2p = 2$ и $K_т = 1{,}3\,(1 - D_a)$ при $2p \geqslant 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{мех} = 1{,}2 \cdot 2p\tau^3 (n_к + 11) \cdot 10^3, \quad (6\text{-}206)$$

где $n_к$ — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_к = 0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{мех} = K_т \left(\frac{n}{1000}\right)^2 (10D_{вент})^3, \quad (6\text{-}207)$$

где $D_{вент}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{вент} \approx D_a$;

$K_т = 2{,}9$ для двигателей с $D_a \leqslant \leqslant 0{,}25$ м.

$K_т = 3{,}6$ для двигателей с $D_a = 0{,}25 \div 0{,}5$ м;

В двигателях большой мощности $(0{,}5 < D_a < 0{,}9$ м)

$$P_{мех} = K_т (10D_a)^3. \quad (6\text{-}208)$$

В этом выражении коэффициент $K_т$ берется из табл. 6-25.

Таблица 6-25

К расчету механических потерь двигателей большой мощности

$2p$	2	4	6	8	10	12
$K_т$	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Потери на трение щеток о конкретные кольца, Вт, рассчитывают для двигателей с фазными роторами при отсутствии приспособлений для подъема щеток и закорачивания контактных колец в номинальном режиме работы

$$P_{тр.щ} = K_{тр} \rho_щ S_щ v_к, \quad (6\text{-}209)$$

где $K_{тр}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,16—0,17);

$\rho_щ$ — давление на контактной поверхности щеток, Па (см. табл. П-35);

$S_щ$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, м²;

$v_к$ — линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т. е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1—2% (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает средние расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5% номинальной мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{доб} = P_{доб,н} \left(\frac{I_1}{I_{1н}}\right)^2. \quad (6\text{-}210)$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}, \quad (6\text{-}211)$$

где ΣP — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{х.х} = \sqrt{I^2_{х.х.а} + I^2_{х.х.р}}. \quad (6\text{-}212)$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1х.х}}{mU_{1н}}. \quad (6\text{-}213)$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными

$$P_{э1х.х} = mI^2_\mu r_1. \quad (6\text{-}214)$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{х.х.р} \approx I_\mu.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_{х.х} = \frac{I_{х.х.а}}{I_{х.х}}. \quad (6\text{-}215)$$

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости P_1, I_1, $\cos\varphi$, η, $s=f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M=f(P_2)$ и $I_2=f(P_2)$.

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной

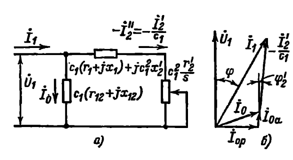


Рис. 6-43. Преобразованная Г-образная схема замещения приведенной асинхронной машины (*а*) и соответствующая ей векторная диаграмма (*б*).

машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 6-43). Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины. Коэффициент $\underline{c}_1$ представляет собой взятое с обратным знаком отношение вектора напряжения фазы $\dot{U}_1$ к вектору ЭДС $\dot{E}_1$, при синхронном вращении машины с учетом сдвига фаз этих векторов. Значение $\underline{c}_1$ определяется из выражения

$$\underline{c}_1=\frac{\underline{Z}_1+\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{12}}=1+\frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{12}}=c_1 e^{-j\gamma}, \qquad (6\text{-}216)$$

где

$$\gamma=\operatorname{arctg}\frac{r_1x_{12}-r_{12}x_1}{r_{12}(r_1+r_{12})+x_{12}(x_1+x_{12})}. \qquad (6\text{-}217)$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2—3 кВт, как правило, $|\gamma|\leqslant 1°$, поэтому реактивной составляющей коэффициента $\underline{c}_1$ можно пренебречь, тогда приближенно

$$c_1\approx 1+\frac{x_1}{x_{12}}. \qquad (6\text{-}218)$$

При более точных расчетах определяют и активную и реактивную составляющие $\underline{c}_1$:

$$c_{1a}=\frac{r_{12}(r_1+r_{12})+x_{12}(x_1+x_{12})}{r_{12}^2+x_{12}^2}; \qquad (6\text{-}219)$$

$$c_{1p}=\frac{x_1r_{12}-r_1x_{12}}{r_{12}^2+x_{12}^2}. \qquad (6\text{-}220)$$

Полное значение c_1

$$c_1=\sqrt{c_{1a}^2+c_{1p}^2}. \qquad (6\text{-}221)$$

Как видно, выражение (6-218) может быть получено из (6-221) при условии $r_{12}\ll x_{12}$ и $r_1\ll x_{12}$, что практически всегда имеет место в асинхронных машинах мощностью $P_2\geqslant 2\div 3$ кВт. При этих же условиях $c_{1p}\approx 0$ и $c_{1a}\approx c_1$.

Рабочие характеристики могут быть рассчитаны с помощью круговой диаграммы или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведен на язык программ при использовании ЭВМ в расчетах.

Аналитический метод расчета. Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 6-26 в удобной для ручного счета последовательности. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s\approx\approx(0{,}2\div 1{,}5)\,s_н$. Номинальное скольжение можно предварительно взять $s_н\approx r_2'$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы (см. пример расчета).

Перед началом расчета рекомендуется выписать значения постоянных, не зависящих от скольжения величин, как это показано в формуляре и в примере расчета. К таким величинам относятся: номинальное напряжение фазы $U_{1н}$, сопротивления r_1 и r_2', сумма потерь $P_{ст}+P_{мех}$ (для двигателей с фазным ротором также $P_{тр,щ}$) и составляю-

Таблица 6-26

Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя

$P_{2н}$=...кВт; $U_{1н}$=...В; $2p$=...; $I_{1н}$=...А; $P_{ст}+P_{мех}+P_{тр.щ}$=...кВт; $P_{доб.н}$=...кВт; $I_{0а}$=...А; $I_{0р} \approx I_{\mu}$=...А; r_1=...Ом; r'_2=...Ом; c_1=...Ом; a'=...Ом; a=...Ом; b'=...Ом; b=...Ом

№ п/п.	Расчетная формула	Единица	Скольжение				
			0,005	0,01	0,015		$s_н$
1	$a' \, r'_2/s$	Ом					
2	$b' \, r'_2/s$	Ом					
3	$R = a + a' \, r'_2/s$	Ом					
4	$X = b + b' \, r'_2/s$	Ом					
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом					
6	$I''_2 = U_{1н}/Z$	А					
7	$\cos \varphi'_2 = R/Z$	—					
8	$\sin \varphi'_2 = X/Z$						
9	$I_{1а} = I_{0а} + I''_2 \cos \varphi'_2$	А					
10	$I_{1р} = I_{0р} + I''_2 \sin \varphi'_2$	А					
11	$I_1 = \sqrt{I^2_{1а} + I^2_{1р}}$	А					
12	$I'_2 = c_1 I''_2$	А					
13	$P_1 = 3U_{1н} I_{1а} \cdot 10^{-3}$	кВт					
14	$P_{э1} = 3I^2_1 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{э2} = 3I'^2_2 r'_2 \cdot 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{доб} = P_{доб.н} \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2 \cdot 10^{-3}$	кВт					
17	$\Sigma P = P_{ст} + P_{мех} + P_{э1} + P_{э2} + P_{доб}$	кВт					
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт					
19	$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$	—					
20	$\cos \varphi = I_{1а}/I_1$	—					

щие тока синхронного холостого хода: реактивная $I_{0р} \approx I_{\mu}$ и активная, которую определяют из выражения

$$I_{0а} = \frac{P_{ст.осн} + 3I^2_{\mu} r_1}{3U_{1н}}. \qquad (6\text{-}222)$$

Выписывается также значение коэффициента c_1, определенное по (6-218) или по (6-221), и расчетные величины, обозначенные в формуляре a, a', b и b'. Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1.

Если $|\gamma| \leqslant 1°$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае $c_{1р} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left. \begin{aligned} a' &= c_1^2; \quad a = c_1 r_1; \\ b' &= 0; \quad b = c_1 (x_1 + c_1 x'_2). \end{aligned} \right\} \qquad (6\text{-}223)$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (6-219) — (6-221), то

$$\left. \begin{aligned} a' &= c^2_{1а} - c^2_{1р}; \quad a = c_{1а} r_1 - \\ &\quad - c_{1р} x_1 - b' x'_2; \\ b' &= 2c_{1а} c_{1р}; \quad b = c_{1а} x_1 + \\ &\quad + c_{1р} r_1 + a' x'_2. \end{aligned} \right\} \qquad (6\text{-}224)$$

Последовательность расчета понятна из формуляра. После окончания расчета для принятых значений скольжения строится характеристика $s=f(P_2)$, по которой уточняется значение $s_н$, соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2н}$,

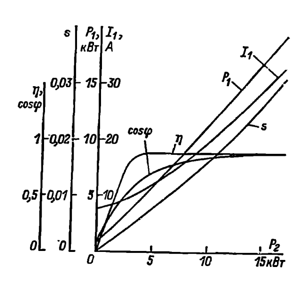


Рис. 6-44. Рабочие характеристики асинхронного двигателя, $P_2=15$ кВт, $2p=4$, $U=$ $=220/380$ В.

и заполняется последняя графа формуляра.

В приведенных формулах не учтено возможное изменение параметров при $s>s_н$. Поэтому при расчете характеристик двигателей с двухклеточными короткозамкнутыми роторами или с роторами, имеющими фигурные пазы, в которых в повышенной степени проявляется действие эффекта вытеснения тока, для каждого из принятых значений скольжения, бо́льших $s_н$, необходимо уточнять значения параметров r_2' и x_2'.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт приведены на рис. 6-44. Расчет характеристик выполнен в § 6-16.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме. Круговая диаграмма асинхронного двигателя изображена на рис. 6-45. Исходными данными для ее построения являются:

ток синхронного холостого хода I_0, А,

$$I_0=\sqrt{I_{0а}^2+I_{0р}^2}. \qquad (6\text{-}225)$$

где $I_{0а}$ по (6-222), $I_{0р}\approx I_\mu$.

Коэффициент c_1 рассчитывают по (6-218) или по (6-221).

Сопротивления короткого замыкания

$$\left.\begin{aligned} x_{к1}&=x_1+c_1x_2';\\ r_{к1}&=r_1+c_1r_2'. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}226)$$

Чтобы размеры круговой диаграммы были удобны для работы,

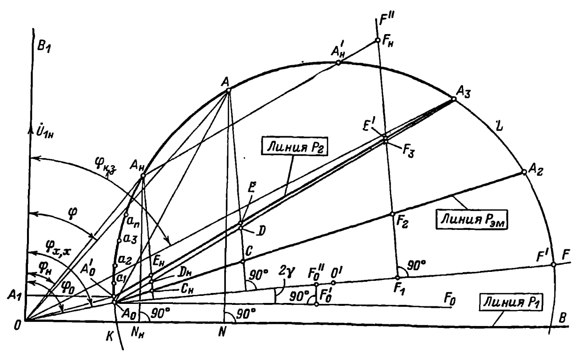


Рис. 6-45. Круговая диаграмма асинхронного двигателя.

целесообразно вначале выбрать ее диаметр $D_к$ (в пределах 200—250 мм), после чего рассчитать масштабы:

масштаб тока, А/мм: $m_I = \frac{U_{1н}}{c_1 x_{к1} D_к}$;

масштаб мощности, Вт/мм: $m_P = 3U_{1н} m_I$;

масштаб момента, Н·м/мм: $m_M = m_P/\Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi f_1}{p}$.

При построении диаграммы вектор напряжения $U_{1н}$ направляют по оси ординат OB_1. Из начала координат строят вектор тока синхронного холостого хода $OA_0 = \frac{1}{m_I} I_0$ под углом φ_0 к оси ординат $\varphi_0 = \arccos \frac{I_{0а}}{I_0}$. Точку A_0 удобно найти, отложив по вертикальной и горизонтальной осям ее координаты, соответственно равные $I_{0а}$ и $I_{0р}$.

Через точку A_0 проводятся линии $A_0F_0 \| OB$ и A_0F под углом 2γ к оси ординат. Из-за малости γ построение угла $\angle F_0A_0F$ удобно выполнять следующим образом. В произвольной точке F_0' прямой A_0F_0 восстанавливается перпендикуляр к линии A_0F_0 и откладывается на нем отрезок $|F_0'F_0''| = |A_0F_0'| \times \times \operatorname{tg} 2\gamma \approx |A_0F_0'| \cdot 2\operatorname{tg}\gamma$:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}. \quad (6\text{-}227)$$

Линия A_0F определяет положение диаметра круговой диаграммы. Отложив на ней отрезок $|A_0O'| = 0{,}5\,D_к$, проводим окружность с центром O' радиусом $0{,}5\,D_к$. Через произвольную точку F_1 диаметра A_0F' проводится линия $(F''F_1) \perp (A_0F)$ и откладываются на ней отрезки $|F_1F_2| = |A_0F_1| \frac{r_1}{x_{к1}}$ и $|F_1F_3| = |A_0F_1| \frac{r_{к1}}{x_{к1}}$. Через точку A_0 и точки F_2 и F_3 проводятся прямые до пересечения их с окружностью соответственно в точках A_2 и A_3. На оси ординат откладывается отрезок $|OA_1| = P_0/m_P$, где $P_0 = P_с + 3I_0^2 r_1 + P_{мех}$, и через точку A_1 проводится $|A_1A_0'| \| OB$. Точка A_0' соединяется с точками O и A_3. На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

Окружность диаметром $D_к$ и с центром O' является геометрическим местом концов векторов тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка окружности A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а точка A_0' — при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок OA_0' определяет ток $I_{х.х}$, а угол $\angle A_0' OB_1$ — $\cos\varphi_{х.х}$. Точка A_3 окружности определяет положение конца вектора тока при коротком замыкании ($s=1$), отрезок OA_3 — ток $I_{к.з}$, а угол $\angle A_3OB_1$ — $\cos\varphi_{к.з}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока при $s=\infty$.

Промежуточные точки на дуге окружности $\smile A_0A_3$ определяют положение концов векторов тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leqslant 1$). Ось абсцисс диаграммы OB является линией первичной мощности P_1. Линией электромагнитной мощности $P_{эм}$ или электромагнитных моментов $M_{эм}$ является линия A_0A_2. Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия $A_0'A_3$. По круговой диаграмме для тока статора, которому соответствует точка A на окружности, можно рассчитать необходимые для построения рабочих характеристик данные:

тока статора, А, $I_1 = m_I |OA|$;

ток ротора, А, $I_2' = m_I |A_0A|$;

первичную мощность, Вт, $P_1 = m_P |AN|$, где $AN \perp OB$;

электромагнитную мощность, Вт, $P_{эм} = m_P |AC|$, где $AC \perp A_0F$;

электромагнитный момент $M_{эм} = m_M |AC|$;

полезную мощность, Вт, $P_2 = m_P |AE|$;

КПД $|AE|/|AN|$;

коэффициент мощности $\cos\varphi = \cos\angle AOB_1$;

скольжение двигателя $|DC|/|AC|$.

Для построения рабочих характеристик вначале находят положение на окружности точки $A_н$, которая соответствует номинальному ре-

жиму работы. Для этого, исходя из заданной номинальной мощности $P_{2н}$, рассчитывают длину отрезка $|E'F_н|=P_{2н}/m_P$ и откладывают на линии $F_1F''\perp A_0F$ от точки ее пересечения E' с линией полезной мощности A'_0A_3. Через точку $F_н$ проводят $F_нA_н\|A'_0A_3$. Точки пересечения $F_нA_н$ с окружностью $A_н$ и $A'_н$ определяют положение концов вектора тока I_1 при мощности $P_{2н}$. Точка $A_н$, ближайшая к A'_0, соответствует номинальному режиму; точка $A'_н$ — режиму неустойчивой работы двигателя (при $s>s_{кр}$).

Наметив на дуге $\smile A_0A_н$ несколько точек a_1, a_2, a_3..., определяют соответствующие каждой из них данные I_1, P_1, P_2, $\cos\varphi$, η, M, s.

Из круговой диаграммы можно найти также приближенное значение кратности максимального момента M_{max*}. Оно будет несколько занижено, так же как и в аналитическом расчете без учета изменения параметров от насыщения полями рассеяния и от действия эффекта вытеснения тока.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме связан с определенными погрешностями при выполнении графических работ. Некоторое уточнение может дать сочетание графического метода и элементов аналитического. Например, I_1, I_2 и $\cos\varphi$ определяют по круговой диаграмме, а суммы потерь, P_2, P_1, s и η — расчетным путем, используя данные круговой диаграммы. В этом случае можно также учесть дополнительные потери, которые при построении круговой диаграммы не принимаются во внимание.

Такая методика расчета иногда применяется на практике. Однако все более широкое распространение ЭВМ делает аналитический метод расчета рабочих характеристик предпочтительным.

6-12. ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Учет эффекта вытеснения тока. Известно, что с увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается. При этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное — уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, увеличивая начальные моменты двигателей. Это широко используют при проектировании асинхронных машин, выполняя роторы с глубокими прямоугольными или фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, в которых эффект вытеснения тока проявляется особенно сильно. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным последствиям. Например, при неудачно выбранных размерных соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибаются в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя. В связи с этим правильный учет влияния эффекта вытеснения тока является необходимым при проектировании асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

В расчетах оказалось удобнее определять не непосредственно активное и индуктивное сопротивления стержней при неравномерной плотности тока, а их относительные изменения под действием эффекта вытеснения тока. Эти изменения оцениваются коэффициентами k_r и $k_д$. Коэффициент k_r показывает, во сколько раз увеличилось активное сопротивление $r_{c\xi}$ пазовой части стержня при неравномерном распределении плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением при одинаковой плотности по всему сечению стержня r_c:

$$k_r = r_{c\xi}/r_c. \qquad (6\text{-}228)$$

Коэффициент демпфирования $k_д$ показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda'_{п\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне $\lambda'_п$:

$$k_д = \lambda'_{п\xi}/\lambda'_п. \qquad (6\text{-}229)$$

Аналитическими выражениями, определяющими k_r и $k_д$, полученными для прямоугольных стержней при допущениях о постоянстве удельного сопротивления материала стержня по всей площади его поперечного сечения, бесконечности магнитной проницаемости стали магнитопровода и прямолинейности магнитных линий потока рассеяния в пазу, являются:

$$\left.\begin{aligned} k_r &= \xi\frac{\mathrm{sh}\,2\xi + \sin 2\xi}{\mathrm{ch}\,2\xi - \cos 2\xi}; \\ k_д &= \frac{3}{2\xi}\,\frac{\mathrm{sh}\,2\xi - \sin 2\xi}{\mathrm{ch}\,2\xi - \cos 2\xi}. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}230)$$

В этих выражениях ξ, так называемая приведенная высота стержня, — величина безразмерная, значение которой определяется по формуле

$$\xi = 2\pi h_c\sqrt{\frac{b_c}{b_п}\,\frac{f_2}{\rho_{c\vartheta}}\cdot 10^{-7}}, \qquad (6\text{-}231)$$

где h_c — высота стержня в пазу, м;

b_c и $b_п$ — ширина стержня и ширина паза, м. При расчете роторов со вставными стержнями принимают $b_c=0{,}9b_п$; при роторах с литой обмоткой $b_c=b_п$;

f_2 — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц;

$\rho_{c\vartheta}$ — удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре, Ом·м.

Для двигателей общего назначения с медными вставными стержнями короткозамкнутого ротора при расчетной температуре 75°С ($\rho_{c75}=10^{-6}/47$ Ом·м, см. табл. 4-1) из (6-231) имеем:

$$\xi = 96{,}32h_c\sqrt{s}\sqrt{\frac{b_c}{b_п}}. \qquad (6\text{-}232)$$

При расчетной температуре 115° С ($\rho_{c115}=10^{-6}/41$ Ом·м)

$$\xi = 89{,}96h_c\sqrt{s}\sqrt{\frac{b_c}{b_п}}. \qquad (6\text{-}233)$$

При литой алюминиевой обмотке ротора при расчетных температурах 75 ($\rho_{c75}=10^{-6}/21{,}5$ Ом·м) и 115 ($\rho_{c115}=10^{-6}/20{,}5$ Ом·м) соответственно имеем:

$$\xi = 65{,}15h_c\sqrt{s} \qquad (6\text{-}234)$$

и

$$\xi = 63{,}61h_c\sqrt{s}. \qquad (6\text{-}235)$$

Анализ зависимостей (6-230) показывает, что при $\xi\leqslant 1$ эффект вытеснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. Это является *критерием необходимости* его учета при проектировании.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r, имеющей сечение q_r и сопротивление $r_{c\xi}=r_cq_c/q_r$; h_r называют глубиной проникновения тока в стержень. Для прямоугольных стержней $h_r=h_c/k_r$.

При определении $\lambda_{п\xi}$ аналогично принимают, что ток равномерно распределен по верхней части сечения стержня высотой h_x.

В практических расчетах для определения k_r и $k_д$ пользуются не аналитическими зависимостями (6-230), а построенными на их основе кривыми $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ (рис. 6-46, 6-47). Принятые при выводе (6-230) допущения приводят к положению, что на глубину проникновения не влияют высота и конфигурация стержня. Это позволяет использовать (6-230) и кривые $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ для определения k_r и $k_д$ в стержнях различных конфигураций. Расчет проводят в следующей последовательности. По полной высоте стержня, частоте тока и удельному сопротивлению материала стержня по табл. 4-1 по (6-231) определяют функцию ξ, в соответствии с которой по кривым

рис. 6-46 находят функцию φ, а по кривым рис. 6-47 — функцию φ′.

Далее определяют глубину проникновения тока

$$h_r = \frac{h_c}{1+\varphi} \qquad (6\text{-}236)$$

и коэффициент $k_д = \varphi'$.

Коэффициент k_r находят по отношению площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой h_r, т. е.

$$k_r = q_c/q_r. \qquad (6\text{-}237)$$

По значениям k_r и $k_д$ можно найти сопротивление пазовой части стержня обмотки ротора и коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого стержнем с током,

$$r_{c\xi} = k_r r_c; \qquad (6\text{-}238)$$

$$\lambda'_{п\xi} = k_д \lambda'_п. \qquad (6\text{-}239)$$

Для определения k_r в стержнях некоторых наиболее распространенных конфигураций используют заранее полученные расчетные формулы.

Для прямоугольных стержней (рис. 6-48, *а*)

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{h_c}{h_r} = 1 + \varphi. \qquad (6\text{-}240)$$

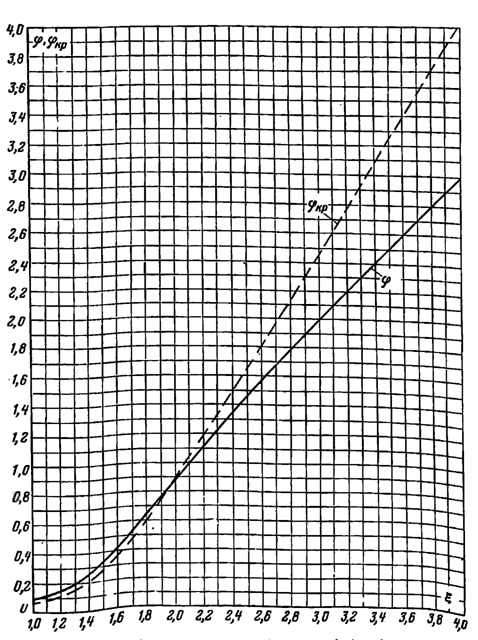


Рис. 6-46. Кривые φ и $\varphi_{кр}$ в функции «приведенной высоты ξ ($\varphi \approx \xi - 1$ при $\xi > 4$ и $\varphi \approx 4\xi^4/45$ при $\xi < 1$).

Для круглых стержней (рис. 6-48, *б*)

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1 + \varphi_{кр}. \quad (6\text{-}241)$$

Функция $\varphi_{кр}$ для круглого стержня представлена на рис. 6-46.

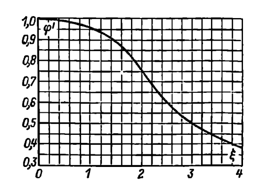


Рис. 6-47. Зависимость коэффициента φ' от приведенной высоты ξ (φ'=3/2ξ при ξ>4).

Для грушевидных стержней (рис. 6-48, *в*)

$$\left.\begin{aligned} k_r &= q_c/q_r; \\ &\text{здесь} \\ q_c &= \frac{\pi\left(b_1^2 + b_2^2\right)}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} h_1. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}242)$$

Площадь сечения q_r при $\frac{b_2}{2} \leqslant h_r \leqslant h_1 + \frac{b_2}{2}$

$$q_r = \frac{\pi b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b_2}{2}\right), \quad (6\text{-}243)$$

где

$$b_r = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1}\left(h_r - \frac{b_2}{2}\right);$$

$$h_r = h_c/(1 + \varphi).$$

При $h_r \leqslant b_2/2$ площадь

$$q_r = \frac{\pi b_2^2}{4\left(\varphi_{кр} + 1\right)}. \quad (6\text{-}244)$$

Для трапецеидальных стержней с узкой верхней частью (см. рис. 6-48, *г*)

$$k_r = q_c/q_r,$$

где q_c и q_r определяют соответственно по (6-242) и по (6-243) или по (6-244);

$$b_r = b_2 + \frac{b_1 - b_2}{h_1}\left(h_r - \frac{b_2}{2}\right). \quad (6\text{-}245)$$

Для других конфигураций стержней k_r может быть определен из общего выражения $k_r = q_c/q_r$ с учетом размерных соотношений стержня.

Для расчета характеристик необходимо учитывать изменение сопротивления всей обмотки ротора r_2, поэтому удобно ввести коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = r_{2\xi}/r_2, \quad (6\text{-}246)$$

где $r_{2\xi}$ — сопротивление фазы короткозамкнутого ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Выражение (6-246) легко преобразовать в более удобный для расчета вид:

$$K_R = \frac{r_2 + r_c\left(k_r - 1\right)}{r_2} = 1 + \frac{r_c}{r_2}\left(k_r - 1\right). \quad (6\text{-}247)$$

Для прямоугольных стержней это выражение приобретает вид:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2}\varphi. \quad (6\text{-}248)$$

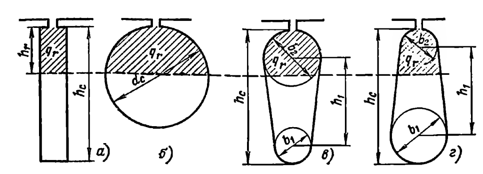


Рис. 6-48. Расчетная глубина проникновения тока в стержнях различной конфигурации

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения будет равно:

$$r_{2\xi} = r_2 K_R. \qquad (6\text{-}249)$$

Обозначив коэффициентом K_x изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, имеем:

$$x_{2\xi} = x_2 K_x, \qquad (6\text{-}250)$$

тогда

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}, \qquad (6\text{-}251)$$

где $\lambda_{п\xi}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока, рассчитанный по формулам табл. 6-23 при $k_д = \varphi'$.

Влияние насыщения на параметры. В предыдущих разделах рассматривались методы расчета параметров при допущении отсутствия насыщения стали магнитопровода полями рассеяния, магнитная проницаемость которой принималась равной бесконечности. При расчетах параметров холостого хода и рабочих режимов это допущение вполне оправдано, так как токи в этих режимах относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения магнитного напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов (рис. 6-49) приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния сколько-нибудь заметного влияния не оказывает.

Уменьшение потока пазового рассеяния из-за насыщения приближенно учитывают введением дополнительного раскрытия паза, равного c. Величина дополнительного раскрытия c берется такой, чтобы его

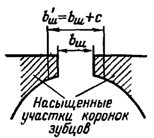


Рис. 6-49. Насыщенные участки коронок зубцов потоками рассеяния.

магнитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии можно использовать для расчета коэффициент магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{ст} = \infty$. Уменьшение $\lambda_п$ из-за насыщения участков зубцов ($\Delta\lambda_{п.нас}$) будет определяться c. Таким образом, c зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния и, следовательно, от МДС паза, т. е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки в свою очередь зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений. Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны

$$k_{нас} = I_{нас}/I,$$

где I — ток, рассчитанный для данного режима без учета насыщения;

$I_{нас}$ — ток в этом же режиме работы машины при насыщении участков зубцов полями рассеяния.

Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают $k_{нас}=1,25\div1,4$; для режима максимального момента $k_{нас}=1,1\div1,2$.

Для двигателей с открытыми пазами следует задаваться меньшими значениями $k_{нас}$, при полузакрытых пазах — бо́льшими.

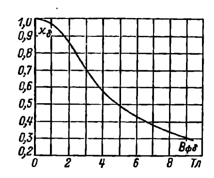


Рис. 6-50. Функция $\varkappa_\delta$ в зависимости от фиктивной индукции $B_{ф\delta}$.

Расчет проводят в следующей последовательности. Определяют среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора,

$$F_{п.ср}=0,7\frac{k_{нас}I_1 u_{п1}}{a}\times$$
$$\times\left(k'_\beta+k_{у1}k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right), \quad (6\text{-}252)$$

где I_1 — ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения;

a — число параллельных ветвей обмотки статора;

$u_{п1}$ — число эффективных проводников в пазу статора;

k'_β — коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза, вызванное укорочением шага обмотки; рассчитывается по (6-151) или (6-152);

$k_{у1}$ — коэффициент укорочения шага обмотки;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент.

По средней МДС $F_{п.ср}$ рассчитывают фиктивную индукцию потока рассеяния в воздушном зазоре

$$B_{ф\delta}=\frac{F_{п.ср}}{1,6\delta C_N}10^{-6}, \quad (6\text{-}253)$$

где коэффициент

$$C_N=0,64+2,5\sqrt{\frac{\delta}{t_1+t_2}} \quad (6\text{-}254)$$

(t_1 и t_2 — зубцовые деления статора и ротора).

По полученному значению $B_{ф\delta}$ определяется отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом $\varkappa_\delta$ значение которого находят по кривой рис. 6-50.

Далее рассчитывают значения дополнительного раскрытия пазов статора и ротора. Для пазов статора его принимают равным

$$c_1=(t_1-b_{ш1})(1-\varkappa_\delta). \quad (6\text{-}255)$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента проводимости рассеяния открытого паза статора (рис. 6-51, *а*)

$$\Delta\lambda_{п1нас}=\frac{h'}{b_ш}\frac{c_1}{b_ш+c_1}. \quad (6\text{-}256)$$

Для полуоткрытых и полузакрытых пазов расчетная формула

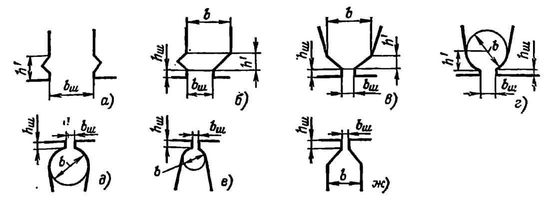


Рис. 6-51. К расчету влияния насыщения полями рассеяния.

несколько усложняется из-за более сложной конфигурации их верхних клиновых частей. Для полуоткрытого паза (рис. 6-51, *б*)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_ш}{b_ш}\,\frac{c_1}{b_ш + c_1} + \frac{h'}{b_ш + b_п}\,\frac{c_1}{b_ш + b_п + c_1}. \quad (6\text{-}257)$$

Для полузакрытого паза (рис. 6-51, *в*, *г*)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_ш + 0{,}58h'}{b_ш}\,\frac{c_1}{c_1 + 1{,}5b_ш}. \quad (6\text{-}258)$$

Для фазных и короткозамкнутых роторов дополнительное раскрытие рассчитывают по формуле

$$c_2 = (t_2 - b_ш)(1 - \varkappa_\delta). \quad (6\text{-}259)$$

Уменьшение коэффициента проводимости для открытых и полузакрытых пазов ротора (рис. 6-51, *д*, *е*, *ж*)

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_ш}{b_ш}\,\frac{c_2}{b_ш + c_2}. \quad (6\text{-}260)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении $\lambda_{п1нас}$ определяют для статора из выражения

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}, \quad (6\text{-}261)$$

где $\lambda_{п1}$ — проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Для ротора

$$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}, \quad (6\text{-}262)$$

где $\lambda_{п2\xi}$ — проводимость пазового рассеяния ротора для ненасыщенной зубцовой зоны с учетом влияния вытеснения тока.

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора $\lambda_{д1нас}$ и ротора $\lambda_{д2нас}$

$$\left.\begin{aligned}\lambda_{д1нас} &= \lambda_{д1}\varkappa_\delta;\\ \lambda_{д2нас} &= \lambda_{д2}\varkappa_\delta.\end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}263)$$

Значения $\varkappa_\delta$ берут по кривым рис. 6-50.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния определяют по отношению сумм коэффициентов проводимости, рассчитанных без учета и с учетом насыщения от полей рассеяния,

$$x_{1нас} = x_1 \frac{\Sigma\lambda_{1нас}}{\Sigma\lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}. \quad (6\text{-}264)$$

Для ротора принимают отношения сумм проводимостей, рассчитанных без учета влияния насыщения и действия эффекта вытеснения тока (для номинального режима) и с учетом этих факторов,

$$x'_{2\xi нас} = x'_2 \frac{\Sigma\lambda_{2\xi нас}}{\Sigma\lambda_2} = x'_2 \frac{\lambda_{п2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}. \quad (6\text{-}265)$$

Значения параметров $x_{1нас}$ и $x_{2\xi нас}$ используют при расчете точек характеристик при скольжениях $s \geqslant s_{кр}$. Полученные для каждой из точек характеристики значения кратности токов сравнивают с принятыми коэффициентами $k_{нас}$. Если расхождение превышает 10—15%, то расчет для этого значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принимаемый коэффициент $k_{нас}$.

Расчет пусковых характеристик. Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым и максимальным моментами и начальным пусковым током. В двигателях с фазными роторами начальный момент и пусковой ток определяются сопротивлением пускового реостата. В двигателях с короткозамкнутыми роторами значения моментов и начального тока зависят от соотношений параметров. Кроме того, важным показателем пусковых свойств короткозамкнутого двигателя является значение минимального момента. Уменьшение момента в процессе разгона двигателя может произойти при уменьшении скольжения в связи с изменением соотношения параметров.

Стандарты на асинхронные двигатели устанавливают наименьшие допустимые относительные значения моментов и наибольшие относительные значения начальных пусковых

Таблица 6-27

Кратность начальных пусковых моментов $M_{п*}$ и токов $I_{п*}$ асинхронных двигателей серии 4А (по ГОСТ 19523-74)

Исполнение	h, мм	<132		160—250		>280	
	$2p$	$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$	$M_{п*}$	$I_{п*}$
А	2	1,7—2,0	6,5—7,5	1,2—1,4	7,0—7,5	1,0—1,2	6,5—7,0
	4	2,0—2,2	5,0—7,5	1,2—1,4	6,5—7,5	1,2—1,3	5,5—7,0
	6	2,0—2,2	4,0—6,5	1,2—1,3	5,0—6,5	1,4	5,5—6,5
	8	1,6—1,9	4,0—5,5	1,2—1,4	5,5—6,0	1,2	5,5—6,5
	10	—	—	1,2	6,0	1,0	6,0
	12	—	—	—	—	1,0	6,0
АН	2	—	—	1,2—1,3	7,0	1,0—1,2	6,5—7,0
	4	—	—	1,2—1,3	6,5	1,0—1,2	6,0—7,0
	6	—	—	1,2	6,0—7,0	1,2	6,0
	8	—	—	1,2—1,3	5,5—6,0	1,2	5,0—5,5
	10	—	—	—	—	1,0	5,5
	12	—	—	—	—	1,0	5,5

Примечание. Некоторые двигатели малой мощности с высотой оси вращения $h \leqslant 80$ мм выполняются с уменьшенной кратностью начального пускового тока при $2p=2$ до $I_{п*}=4{,}0$; при $2p=4$ — до $I_{п*}=2{,}5$ и при большей полюсности — до $I_{п*}=3{,}0$.

токов для выпускаемых асинхронных машин в зависимости от их мощности, исполнения и числа пар полюсов. Для короткозамкнутых двигателей регламентируются значения всех перечисленных выше моментов и тока, а для двигателей с фазными роторами — только значения максимальных моментов, т. е. перегрузочная способность двигателей.

В табл. 6-27 приведены данные из ГОСТ 19523-74 на асинхронные двигатели с короткозамкнутыми роторами серии 4А, которые содержат допустимые относительные значения моментов и начального пускового тока. Спроектированная заново асинхронная машина на базе серии 4А должна иметь пусковые характеристики, удовлетворяющие этим требованиям. В технических условиях или в заданиях на проектирование специальных асинхронных двигателей могут быть поставлены более жесткие требования к этим величинам.

В практике расчетов часто ограничиваются определением только двух точек характеристик: начального пускового и максимального моментов и начального пускового тока. Такой расчет дает лишь приближенные сведения о пусковых свойствах двигателя и может привести к погрешности при определении перегрузочной способности из-за неточности определения критического скольжения. Поэтому при проектировании целесообразно рассчитывать полные пусковые характеристики, т. е. зависимости $M_*=f(s)$ и $I_*=f(s)$ для всего диапазона изменения скольжений от $s=1$ до значения, соответствующего режиму, близкому к номинальному.

Расчет пусковых характеристик затруднен необходимостью учета изменений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыщением от полей рассеяния, так как при больших скольжениях токи в обмотках статора и ротора короткозамкнутых двигателей могут превышать свое минимальное значение в 7—7,5 раз (см. табл. 6-27).

В то же время при больших токах увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмотки статора, что вызывает уменьшение ЭДС и снижение основного потока. Для учета этих факторов необходимо применение ЭВМ [18]. При ручном счете используют упрощенные методы.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции x_{12} с уменьшением насыщения магнитопровода увели-

Таблица 6-28

Формуляр расчета пусковых характеристик двигателей с короткозамкнутым ротором

$x_{12п}$=...Ом; x_1=...Ом; x_2'=...Ом; r_1=...Ом; r_2'=...Ом; $I_{1п}$=...А; $I_{2п}$=...А

№ п/п.	Расчетная формула	Единица	Скольжение 1	0,8	0,5...
1	ξ	—			
2	φ	—			
3	$k_r = q_c/q_r$	—			
4	$K_R = 1 + \frac{r_2}{r_c}(k_r - 1)$	—			
5	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом			
6	$k_д$	—			
7	$K_x = \Sigma\lambda_{2\xi}/\Sigma\lambda_2$	—			
8	$x'_{2\xi} = K_x x'_2$	Ом			
9	$x'_{2\xi нас} = x'_2 \Sigma\lambda_{2\xi нас}/\Sigma\lambda_2$	Ом			
10	$x_{1нас} = x_1 \Sigma\lambda_{1нас}/\Sigma\lambda_1$	Ом			
11	$c_{1п.нас} = 1 + x_{1нас}/x_{12п}$	—			
12	$a_п = r_1 + c_{1п.нас}\, r'_{2\xi}/s$	Ом			
13	$b_п = x_{1н} + c_{1п.нас}\, x'_{2\xi нас}$	Ом			
14	$I'_2 = U_{1н}/\sqrt{a_п^2 + b_п^2}$	А			
15	$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_п^2 + (b_п + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}}$	А			
16	$I_{1*} = I_1/I_{1н}$				
17	$M_* = \frac{M}{M_н} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2н}}\right)^2 K_R \frac{s_н}{s}$				

чивается и в расчете пусковых характеристик для диапазона скольжений $s > s_{кр}$ может быть принято равным

$$x_{12п} \approx x_{12}\frac{F_ц}{F_\delta} = k_\mu x_{12}. \quad (6\text{-}266)$$

Не внося большой погрешности, в расчетных формулах пусковых режимов пренебрегают сопротивлением r_{12}.

При этом допущении коэффициент

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}}. \quad (6\text{-}267)$$

и сопротивление правой ветви Г-образной схемы замещения (см. рис. 6-43)

$$z_п = c_{1п}(a_п + jb_п),$$

где

$$a_п = r_1 + c_{1п}\frac{r'_2}{s};\ b_п = x_1 + c_{1п}x'_2. \quad (6\text{-}268)$$

Ток в обмотке ротора

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{|z_п|}c_{1п} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_п^2 + b_п^2}}. \quad (6\text{-}269)$$

Сопротивление всей схемы замещения

$$\underline{Z}_{сх} = \frac{c_{1п}(a_п + jb_п)\,jx_{12п}c_{1п}}{a_п + j(b_п + x_{12п})}. \quad (6\text{-}270)$$

Из (6-268)—(6-270) ток обмотки статора

$$I_1 = \frac{U_{1н}}{|z_{сх}|} = I'_2\frac{\sqrt{a_п^2 + (b_п + x_{12п})^2}}{c_{1н}x_{12н}}. \quad (6\text{-}271)$$

Полученные выражения (6-269) и (6-271) дают возможность рассчитать токи и моменты во всем диапазоне изменения скольжения при разгоне двигателя от $s=1$ до $s=s_{кр}$.

Расчет рекомендуется проводить в последовательности, определенной в формуляре (табл. 6-28). Сопротивления $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ должны быть определены заранее с учетом эффекта вытеснения тока для принятых значений скольжения (для пяти-шести точек характеристики). Для учета влияния насыщения в (6-267)—(6-271) подставляют сопротивления $x_{1нас}$ и $x_{2\xi\,нас}$, которые определяются в зависимости от токов. Их прямое определение до расчета пусковых характеристик невозможно, так как токи еще не известны. Поэтому $x_{1нас}$ и $x'_{2\xi нас}$ находятся для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений. Как известно, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального выбора изменяющихся величин. Для данного расчета хорошие результаты дает следующий практический метод задания токов.

Первоначально рассчитывают пусковые токи при $s=1$ для значений $c_{1п}$, x_1 и $x'_{2\xi}$, полученных без учета насыщения. Далее задают коэффициент увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния $k_{нас}$ и определяют токи при насыщении $I_{1нас}=k_{нас}I_1$.

Для значений токов $I_{1нас}$ и $I'_{2нас}$ по формулам (6-264), (6-265) и (6-267) рассчитывают $x_{1нас}$, $x'_{2\Sigma нас}$ и $c_{1\,п,нас}$ и повторяют расчет токов, вводя полученные значения в расчетные формулы. Если расхождение полученных значений токов и принятых первоначально не превышает 10—15%, то расчет для $s=1$ считают законченным. При больших расхождениях расчет повторяют, соответствующим образом скорректировав коэффициент $k_{нас}$.

Для уменьшения объема расчета других точек характеристики поступают следующим образом. Приближенно по параметрам рабочего режима определяют критическое скольжение

$$s_{кр} \approx \frac{r'_2}{x_1/c_1 + x'_2} \qquad (6\text{-}272)$$

и для значения $s=s_{кр}$ по формуляру расчета пусковых характеристик рассчитывают I_1 и I'_2. Принимают, что при этом скольжении влияние насыщения сказывается мало и $k_{нас}=1,1\div1,2$, а изменение $k_{нас}$ от $s=1$ до $s_{кр}$ происходит по линейному закону. Далее для каждого из назначенных скольжений находят приближенное значение $k_{нас}$ и проводят расчет сопротивлений и токов так же, как при $s=1$.

Такой метод позволяет правильно учесть влияние насыщения с первого или со второго приближения.

Значение $s_{кр}$ уточняют после расчета зависимости $M_*=f(s)$ по значениям параметров с учетом насыщения.

Последовательность расчета пусковых характеристик станет более понятна при ознакомлении с примером расчета, приведенным в § 6-16.

6-13. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РОТОРАМИ, ИМЕЮЩИМИ ДВОЙНУЮ БЕЛИЧЬЮ КЛЕТКУ ИЛИ ФИГУРНЫЕ ПАЗЫ

Необходимость обеспечения высоких пусковых моментов для нормальной работы ряда приводов привела к довольно широкому распространению асинхронных двигателей с роторами, имеющими двойную беличью клетку со вставными стержнями, или фигурные пазы, залитые алюминием. В последние годы получили распространение также двухклеточные роторы с литыми обмотками. Конфигурация и размеры пазов с литыми обмотками не связаны какими-либо ограничениями, налагаемыми сортаментами профильной меди или латуни, поэтому они могут быть выполнены более рационально с точки зрения использования зубцовой зоны ротора и обеспечения высоких пусковых характеристик по сравнению со сварными клетками.

Расчет магнитной цепи двигателей с фигурными стержнями или с двойной клеткой на роторе не отличается от расчета обычных асинхронных машин. Некоторая особенность расчета магнитного напряжения зубцовой зоны ротора учтена в расчетных фомулах, приведенных в § 6-8.

Здесь и далее фигурный стержень литой обмотки ротора будем рассматривать как двойную клетку ротора, причем к пусковой клетке

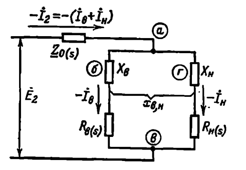


Рис. 6-52. Схема замещения фазы с двойной клеткой.

отнесем верхнюю (прямоугольную или полуовальную — в зависимости от формы фигурного паза) часть стержня, а к рабочей клетке — его нижнюю часть.

Расчет параметров двухклеточного ротора встречает существенные затруднения, так как распределение токов между стержнями верхней и нижней клеток определяется как соотношением их активных сопротивлений, так и частотой скольжения. В то же время при больших скольжениях распределение плотности токов в пределах сечений каждого из стержней также неравномерно из-за действия эффекта вытеснения тока.

При ручном расчете параметров двухклеточных роторов применяют приближенные методы. Наиболее удобны методы, позволяющие получить общее выражение для активного и индуктивного сопротивлений обеих обмоток ротора r_2 и x_2 с учетом распределения токов между стержнями верхней и нижней клеток в зависимости от скольжения ротора. Это дает возможность проводить расчет рабочих и пусковых характеристик двигателей по формулам для машин с одноклеточными роторами.

Рассмотрим один из таких практических методов расчета параметров двухклеточного ротора.

Схема замещения фазы двухклеточного ротора [28] представлена на рис. 6-52. Как видно, сопротивления рабочей и пусковой клеток включены параллельно. Ветвь *а-б-в* содержит сопротивление верхней (пусковой) клетки, ветвь *а-г-в* — сопротивления нижней (рабочей) клетки.

Схеме замещения соответствует система уравнений

$$\left.\begin{aligned} &\dot I_в(R_{в(s)}+jX_в)+\dot I_н jx_{в,н}+\\ &\quad+(\dot I_в+\dot I_н)\underline{Z}_{0(s)}=\dot E_2;\\ &\dot I_н(R_{н(s)}+jX_н)+\dot I_в jx_{н,в}+\\ &\quad+(\dot I_в+\dot I_н)\underline{Z}_{0(s)}=\dot E_2. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}273)$$

В этих уравнениях и на схеме замещения $\dot I_в$, $\dot I_н$ — токи в стержнях верхней и нижней клеток;

$R_{в(s)}$ и $R_{н(s)}$ — активные, а $X_в$ и $X_н$ — индуктивные сопротивления соответственно верхней и нижней клеток;

$x_{н,в}=x_{в,н}$ — сопротивление взаимной индукции между стержнями верхней и нижней клеток;

$\underline{Z}_{0(s)}$ — общее для обеих параллельных ветвей сопротивление.

Анализируя картину поля потока рассеяния в пазу двухклеточного ротора (рис. 6-53), видим, что часть потока пазового рассеяния $\Phi_{\sigma 12}$ сцеплена только со стержнем нижней клетки (участок паза *1-2*). Оставшаяся часть потока $\Phi_{\sigma 23}$, магнитные линии которого проходят через паз выше нижнего стержня (участок паза *2-3*), сцеплена со стержнями и верхней, и нижней клеток. Поэтому сопротивление индуктивности стержня нижней клетки определяется проводимостью всему потоку рассеяния паза, а сопротивление индуктивности верхнего стержня и взаимная индуктив-

ность верхнего и нижнего стержней определяются проводимостью потоку $\Phi_{\sigma 23}$, так как только эта часть потока сцеплена одновременно и с верхними, и с нижним стержнями.

Исходя из этого, примем следующие обозначения:

$x_{\text{п,в}}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки, определяемое проводимостью верхней части паза $\lambda_{\text{п,в}}$ с учетом потокосцепления с верхним стержнем (поток $\Phi_{\sigma 23}$ создается МДС и верхнего, и нижнего стержней);

$(x_{\text{н}} + x_{\text{в}})$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки, причем $x_{\text{н}}$ определяется проводимостью нижнего паза потоку рассеяния $\Phi_{\sigma 12}$ с учетом меняющегося по высоте паза потокосцепления с нижним стержнем, а $x_{\text{в}}$ определяется проводимостью потоку рассеяния $\Phi_{\sigma 23}$ верхней части паза. Потокосцепление потока $\Phi_{\sigma 23}$ с нижним стержнем равно единице.

Кроме того, учтем, что сопротивление взаимной индукции $x_{\text{в,н}} = x_{\text{н,в}}$ определяется также проводимостью верхней части паза потоку $\Phi_{\sigma 23}$.

Детальный анализ потоков рассеяния и математическое выражение коэффициентов магнитной проводимости, определяющих указанные выше сопротивления, показывают, что для принятых в электромашиностроении конфигураций и размерных соотношений пазов верхней и нижней клеток без большой погрешности можно принять $x_{\text{п,в}} \approx x_{\text{в}} \approx x_{\text{в,н}}$, так как эти сопротивления обусловлены проводимостью верхней части паза.

При принятом допущении система уравнений (6-273) может быть записана следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} &(\dot I_{\text{в}} + \dot I_{\text{н}})\,\underline{Z}_{0(s)} + (\dot I_{\text{в}} + \dot I_{\text{н}})\,jx_{\text{в}} + \\ &\quad + \dot I_{\text{в}} R_{\text{в}(s)} = \dot E_2; \\ &(\dot I_{\text{в}} + \dot I_{\text{н}})\,\underline{Z}_{0(s)} + (\dot I_{\text{в}} + \dot I_{\text{н}})\,jx_{\text{в}} + \\ &\quad + \dot I_{\text{н}}(R_{\text{н}(s)} + jx_{\text{н}}) = \dot E_2. \end{aligned}\right\} \tag{6-274}$$

Системе уравнений (6-274) соответствует схема замещения, приведенная на рис. 6-54, которая может служить исходной для определения параметров двухклеточного ротора. Практические формулы для расчета r_2 и x_2 роторов с общими и раздельными замыкающими кольцами несколько различаются.

Рассмотрим вначале метод расчета r_2 и x_2 роторов с общими замыкающими кольцами. Для таких роторов коэффициенты при неизвестных токах в уравнениях (6-274) обозначают следующие сопротивления:

$R_{\text{в}}(s) = r_{\text{в}}/s$ — активное сопротивление стержня верхней клетки;

$R_{\text{н}}(s) = r_{\text{н}}/s$ — активное сопротивление стержня нижней клетки;

$x_{\text{в}} = x_{\text{п,в}}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки;

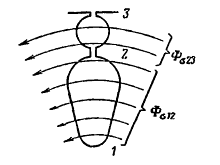


Рис. 6-53. Потоки рассеяния в пазу двухклеточного ротора.

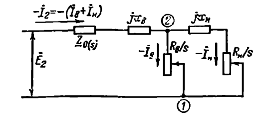


Рис. 6-54. Преобразованная схема замещения фазы ротора с двойной клеткой.

$x_н = x_{п.н}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки;

$\underline{Z}_{0(s)} = \underline{Z}_{кл(s)} + jx_д$, где $\underline{Z}_{кл(s)}$ — сопротивление участков замыкающих колец между двумя соседними пазами, приведенное к току ротора (см. § 6-9);

$x_д$ — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки ротора.

Эквивалентное сопротивление разветвленной цепи этой схемы между точками 1—2

$$\underline{Z}_{э(s)} = \frac{r_в/s\,(r_н/s + jx_{п.н})}{r_в/s + r_н/s + jx_{п.н}} = \frac{1}{s}\,\frac{\alpha r_н + jr_в\beta s}{1 + j\beta s}, \quad (6\text{-}275)$$

где

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{r_н/s}{r_в/s + r_н/s} = \frac{r_в}{r_в + r_н};\\ \beta &= \frac{x_{п.н}}{r_в + r_н}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}276)$$

Представим $\underline{Z}_э(s)$ в виде суммы активного $r_э$ и индуктивного $x_э$ сопротивлений

$$\underline{Z}_{э(s)} = r_э\frac{1}{s} + jx_э = \frac{1}{\alpha}\,\frac{\alpha r_н + r_в\beta^2 s^2}{1 + \beta^2 s^2} + j\beta\frac{r_в - \alpha r_н}{1 + \beta^2 s^2}$$

и упростим выражение для $r_э$ и $x_э$:

$$\left.\begin{aligned} r_э &= r_в\left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2}\right);\\ x_э &= x_{п.н}\frac{\alpha^2}{1 + \beta^2 s^2}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}277)$$

Сопротивления $r_э$ и $x_э$ зависят от скольжения, так как изменение соотношения активных и индуктивных сопротивлений стержней, вызванное изменением частоты тока в роторе, меняет соотношение токов в стержнях рабочей и пусковой клеток.

При скольжениях $s \ll 1$, соответствующих холостому ходу и номинальному режиму двигателей, из (6-277) получим:

$$\left.\begin{aligned} r_{э.х.х} &= r_в(1 - \alpha);\\ x_{э.х.х} &= x_{п.н}\alpha^2. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}278)$$

Коэффициенты изменения эквивалентных сопротивлений $r_э$ и $x_э$ в зависимости от скольжения

$$k'_x = \frac{x_э}{x_{э.х.х}} = \frac{1}{1 + \beta^2 s^2}; \quad (6\text{-}279)$$

$$k'_r = \frac{r_э}{r_{э.х.х}} = \frac{1}{1-\alpha}\left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2}\right) = \frac{1}{1-\alpha}\left(1 - \alpha k'_x\right). \quad (6\text{-}280)$$

На основании полученных соотношений и с учетом материала § 6-12 запишем основные расчетные формулы для определения r_2 и x_2 двухклеточных роторов с общими замыкающими кольцами (двухклеточные роторы с литыми обмотками и роторы с фигурными пазами).

При $s_0 < s \leqslant s_н$ активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_2 = r_{э.х.х} + r_0 = r_в(1 - \alpha) + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2}, \quad (6\text{-}281)$$

где α — по (6-276), причем

$$\left.\begin{aligned} r_в &= \rho_{в\vartheta}\frac{l_в}{q_в};\\ r_н &= \rho_{н\vartheta}\frac{l_н}{q_н}; \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}282)$$

$\rho_{в\vartheta}$, $\rho_{н\vartheta}$, $l_в$, $l_н$, $q_в$, $q_н$ — удельные сопротивления при расчетной температуре, длины и площади поперечных сечений стержней верхней и нижней клеток; при литых обмотках с общими замыкающими кольцами $\rho_{в\vartheta} = \rho_{н\vartheta}$ и $l_в = l_н$.

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_2 = x_{п.в} + x_0 + x_{э.х.х}, \quad (6\text{-}283)$$

где

$$\left.\begin{aligned} x_{п.в} &= 7{,}9f_1 l'_\delta \lambda_{п.в}\cdot 10^{-6};\\ x_0 &= 7{,}9f_1 l'_\delta(\lambda_{д2} + \lambda_{кл2})\cdot 10^{-6};\\ x_{э.х.х} &= x_{п.н}\alpha^2 = 7{,}9f_1 l'_\delta \lambda_{п.н}\alpha^2\cdot 10^{-6}. \end{aligned}\right\} \quad (6\text{-}284)$$

С учетом (6-284)

$$x_2 = 7{,}9f_1 l'_\delta(\lambda_{п.в} + \lambda_{п.н}\alpha^2 + \lambda_{д2} + \lambda_{кл2})\cdot 10^{-6}, \quad (6\text{-}285)$$

где $\lambda_{п,в}$ и $\lambda_{п,н}$ — коэффициенты магнитных проводимостей потоков пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток, которые определяются в зависимости от конфигурации пазов верхней и нижней клеток по формулам табл. 6-29;

$\lambda_{д2}$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора, который определяется по (6-174);

$\lambda_{кл2}$ — коэффициент магнитной проводимости участков замыкающего кольца, приведенный к току ротора, который определяется по (6-176) или по (6-177).

Для пусковых режимов ($s \gg s_п$) $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ роторов с общими замыкающими кольцами рассчитывают по следующим формулам.

Активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_{2\xi} = r_в(1-\alpha)k'_r + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = r_в\left(1-\alpha k'_x\right) + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2}. \quad (6\text{-}286)$$

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_{2\xi} = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п,в} + \lambda_{п,н}\alpha^2 k'_x + \lambda_{кл2} + \lambda_д)\cdot 10^{-6}. \quad (6\text{-}287)$$

В этих формулах k'_x и k'_r рассчитывают по (6-279) и (6-280), в которых α и β определяются по (6-276), а $\lambda_{п,в}$ и $\lambda_{п,н}$ — по формулам табл. 6-29.

При этом предполагается, что плотность тока в пределах сечения каждого из стержней постоянна. При $\xi_в > 1$ и $\xi_н > 1$ можно несколько повысить точность расчета, учитывая влияние эффекта вытеснения тока на сопротивления каждого из стержней. Для этого рассчитывают последовательно для верхнего стержня $\xi_в$, $k_{rв}$, $r_{в\xi}$, $k_{д,в}$, $x_{в\xi}$ по формулам, приведенным в § 6-12, и для сопротивлений нижнего стержня $\xi_н$, $k_{rн}$, $r_{н\xi}$, $k_{д,н}$ и $x_{п,н\xi}$, после чего определяют $\alpha_\xi = \frac{r_{в\xi}}{r_{в\xi}+r_{н\xi}}$ и $\beta_\xi = \frac{x_{п,н\xi}}{r_{в\xi}+r_{н\xi}}$ и рассчитывают по этим данным $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ с учетом влияния эффекта вытеснения тока на сопротивления каждого из стержней для принятых значений [по (6-279) и (6-280)]. Обычно $k_{rв}$ и $k_{rн}$ близки к единице и уточнения расчета не требуется.

При детальных расчетах пускового момента и тока следует учесть также влияние насыщения от полей рассеяния на проводимость паза верхней клетки. Расчет проводят аналогично изложенному в § 6-12.

При расчете сопротивлений роторов с раздельными замыкающими кольцами (двухклеточные роторы с обмоткой из вставных стержней) принимают, что индуктивное сопротивление участков замыкающего кольца верхней клетки приблизительно равно сопротивлению взаимоиндуктивности участков колец верхней и нижней клеток. Такое допущение позволяет использовать ту же схему замещения (см. рис. 6-54), несколько изменив значения ее параметров. В схеме замещения ротора с раздельными кольцами:

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец верхней клетки

$$R_в = r_в + \frac{2r_{кл,в}}{\Delta^2}; \quad (6\text{-}288)$$

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец нижней клетки

$$R_н = r_н + \frac{2r_{кл,н}}{\Delta^2}; \quad (6\text{-}289)$$

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец верхней клетки

$$x_п = x_{п,в} + x_{кл,в} = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п,в} + \lambda_{кл,в})\cdot 10^{-6}; \quad (6\text{-}290)$$

Таблица 6-29

Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами

Рисунок	Расчетные формулы	
	$\lambda_{п,в}$	$\lambda_{п,н}$
6-55, *а*	$\left(0,785-\frac{b_ш}{2b_в}\right)k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\left(0,785-\frac{b_0}{2b_н}\right)k_{д,н}+\frac{h_0}{b_0}$
6-55, *б*	$\left(0,785-\frac{b_ш}{2b_в}\right)k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\frac{h_н}{3b_н}k_{д,н}+\frac{h_0}{b_0}$
6-55, *в*	$\left(0,785-\frac{b_ш}{2b_в}\right)k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\frac{h'_н}{3b_н}\left(1-\frac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0,66-\frac{b_0}{2b_н}\right]k_{д,н}+\frac{h_0}{b_0}$
6-55, *г*	$\left(0,785+\frac{h'_в-h_ш}{2b_в}\right)k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\frac{h'_н}{3b_н}\left(1-\frac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0,66-\frac{b_0}{2b_н}\right]k_{д,н}+\frac{h_0}{b_0}$
6-55, *д*	$\frac{h_в}{2b_в}k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\left(0,785+\frac{b_н}{2b_н}\right)k_{д,н}$
6-55, *е*	$\left(\frac{h'_в}{2b_в}+\frac{3h'_в}{b+2b_ш}\right)k_{д,в}+\frac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\frac{h'_н}{3b_н}\left(1-\frac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0,66-\frac{b_н}{2b_н}\right]k_{д,н}$

Примечания: 1. При закрытых пазах в расчетные формулы вместо $h_ш/b_ш$ подставлять $0,3+1,12\frac{h'_ш}{I_2}10^6$, где $h'_ш$ — толщина перемычки над пазом, м; I_2 — ток ротора, А.

2. При расчете параметров холостого хода и номинального режима принимать $k_{д,в}=k_{д,н}=1$.

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец нижней клетки

$$x_н = x_{п,н}+x_{кл,н} = 7,9f_1 l'_\delta(\lambda_{п,н}+\lambda_{кл,н})\cdot 10^{-6}. \quad (6\text{-}291)$$

В этих выражениях $\lambda_{п,в}$ и $\lambda_{п,н}$ — коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток (рассчитываются в зависимости от конфигурации пазов по данным табл. 6-29); $\lambda_{кл,в}$, $\lambda_{кл,н}$ — коэффициенты магнитной проводимости участков замыкающих колец [рассчитываются по (6-176) или (6-177)].

Общее сопротивление для обеих параллельных ветвей схемы замещения

$$z_0 = x_0 = x_д = 7,9f_1 l'_\delta\lambda_д\cdot 10^{-6}, \quad (6\text{-}292)$$

где $\lambda_д$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния, рассчитываемый по (6-174).

Сопротивления r_2 и x_2 роторов с раздельными замыкающими кольцами для холостого хода и номинального режима работы, Ом,

$$r_2 = r_{э,х,х} = R_в(1-\alpha); \quad (6\text{-}293)$$

$$x_2 = x_в + x_{э,х,х} + x_0 = 7,9f_1 l'_\delta(\lambda_{п,в}+\lambda_{п,н}\alpha^2+\lambda_{кл,в}+\lambda_д)\cdot 10^{-6}, \quad (6\text{-}294)$$

где $\alpha = \frac{R_в}{R_н+R_в}$.

Сопротивления $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ для пусковых режимов работы ($s \gg s_н$), Ом,

$$r_{2\xi} = r_э = R_в(1-\alpha k'_x); \quad (6\text{-}295)$$

$$x_{2\xi} = 7,9f_1 l'_\delta(\lambda_{п,в}+\lambda_{п,н}\alpha^2 k'_x + \lambda_{кл,в}+\lambda_д)\cdot 10^{-6}, \quad (6\text{-}296)$$

где k'_x определяется по (6-279) при

$$\beta = \frac{X_{\text{п}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{н}}}. \qquad (6\text{-}297)$$

Эффект вытеснения тока в каждом из стержней и влияние насыщения полями рассеяния на парамет-

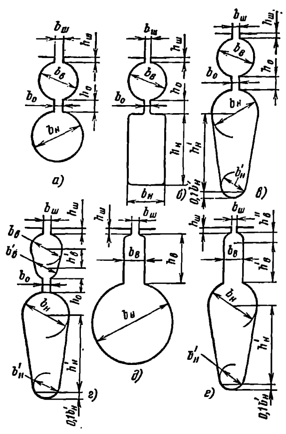


Рис. 6-55. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами.

ры ротора учитывают так же, как и для роторов с общими замыкающими кольцами.

Приведенный метод расчета параметров двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами, как и другие аналогичные ему методы, учитывающие индуктивную связь только между полными токами каждого из стержней, являются приближенными, однако они находят применение в расчетной практике благодаря своей простоте и возможности проведения расчета без применения ЭВМ.

Более точный метод расчета параметров ротора с произвольной конфигурацией стержней, в том числе и двухклеточных роторов, значительно более полно учитывающий зависимость параметров ротора от частоты тока в нем, изложен в следующем параграфе.

6-14. ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКА В РОТОРНЫХ СТЕРЖНЯХ ПРОИЗВОЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Описанные выше методы определения k_r и $k_д$ обмотки короткозамкнутых роторов основаны на решении задач о распределении тока в прямоугольных стержнях. В роторах современных асинхронных двигателей с фигурными пазами поле потока рассеяния имеет значительно более сложную конфигурацию, чем в прямоугольных, и эти методы оказываются недостаточно точными, так как они не полностью учитывают индуктивные связи разных по высоте участков сечения стержня.

Точное решение задачи для каждой из применяемых конфигураций стержней достаточно сложно и требует в каждом конкретном случае много времени для подготовки программы расчета на ЭВМ. Получение же критериальных зависимостей (как это сделано, например, для прямоугольного стержня) практически невозможно из-за большого числа размерных соотношений стержней, влияющих на k_r и $k_д$.

В [17] предложен метод расчета k_r и $k_д$, в котором задача расчета поля сводится к решению системы алгебраических уравнений, причем программа решения остается неизменной для любой конфигурации стержней, что делает метод достаточно универсальным.

Из [27] известно, что схема замещения роторной цепи с изменяющимися под влиянием эффекта вытеснения тока параметрами может быть представлена в виде многозвенной цепи с постоянными, не зависящими от вытеснения тока сопротивлениями (рис. 6-56).

В [17] это качественное представление обосновано математически и предложен метод расчета сопротивлений многозвенной схемы замещения ротора, который основан на следующем.

Считая известной конфигурацию магнитных линий потока рассеяния в пазу, представим массивный проводник (стержень короткозамкнутой обмотки ротора) подразделенным на большое число элементарных слоев, изолированных друг от

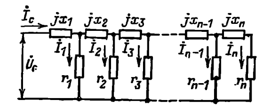


Рис. 6-56. Многозвенная схема замещения стержня ротора короткозамкнутой обмотки.

друга бесконечно тонким слоем изоляции, границы которых определяются магнитными силовыми линиями (рис. 6-57). Допустим, что поле в пазу плоскопараллельно и плотность тока вдоль силовой линии не меняется. При достаточно малой высоте элементарных слоев эти допущения не вносят заметной погрешности в расчет.

С учетом принятых допущений математически можно показать, что параметрами схемы замещения (рис. 6-56) являются следующие сопротивления.

Активное сопротивление i-го элементарного слоя (на единицу длины)

$$r_i = \rho_c/q_i, \qquad (6\text{-}298)$$

где q_i — площадь сечения i-го элементарного слоя.

Условное индуктивное сопротивление i-го элементарного слоя

$$x_i = \omega_2\mu_0\lambda_i, \qquad (6\text{-}299)$$

где ω_2 — угловая частота тока в стержне ротора;

λ_i — геометрическая проводимость магнитной трубки, границы которой определяют i-й слой; λ_i в простейшем случае определяется как отношение средней ширины трубки к ее длине; для трубок с переменным сечением λ_i может быть найдена одним из известных более точных способов расчета проводимости трубки.

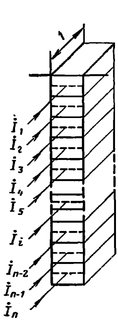


Рис. 6-57. Подразделение массивного стержня на элементарные слои.

Токами в схеме замещения являются:

$\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$... — токи в элементарных слоях;

полный ток в стержне

$$\dot{I}_c = \sum_1^n \dot{I}_i. \qquad (6\text{-}300)$$

Обозначим напряжение на единицу длины стержня U_c.

Для определения $r_{c\xi}$ и $\lambda'_{п\xi}$ необходимо рассчитать токи $\dot{I}_i$ в многозвенной схеме замещения, что может быть выполнено различными методами. Один из наиболее простых заключается в решении системы уравнений, соответствующей этой схеме:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot I_1(r_1+jx_1)+\dot I_2jx_1+\dot I_3jx_1+\ldots+\dot I_{n-1}jx_1+\dot I_njx_1=\dot U_c;\\
&\dot I_1jx_1+\dot I_2\left(r_2+j\sum_1^2 x_i\right)+\dot I_3j\sum_1^2 x_i+\ldots+\dot I_{n-1}j\sum_1^2 x_i+\\
&\qquad+\dot I_nj\sum_1^2 x_i=\dot U_c;\\
&\dot I_1jx_1+\dot I_2j\sum_1^2 x_i+\dot I_3\left(r_3+j\sum_1^3 x_i\right)+\ldots+\dot I_{n-1}j\sum_1^3 x_i+\\
&\qquad+\dot I_nj\sum_1^3 x_i=\dot U_c;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\dot I_1jx_1+\dot I_2j\sum_1^2 x_i+\dot I_3j\sum_1^3 x_i+\ldots+\dot I_{n-1}\left(r_{n-1}+j\sum_1^{n-1}x_i\right)+\\
&\qquad+\dot I_nj\sum_1^{n-1}x_i=\dot U_c;\\
&\dot I_1jx_1+\dot I_2j\sum_1^2 x_i+\dot I_3j\sum_1^3 x_i+\ldots\dot I_{n-1}j\sum_1^{n-1}x_i+\\
&\qquad+\dot I_n\left(r_n+j\sum_1^n x_i\right)=\dot U_c;\\
&\dot I_1+\dot I_2+\dot I_3+\ldots+\dot I_{n-1}+\dot I_n=\dot I_c.
\end{aligned}\right\}\qquad(6\text{-}301)$$

Матрица системы (6-301) легко приводится к виду:

$$\begin{Vmatrix}
r_1 & -(r_2+jx_1) & -jx_2 & \ldots-jx_2 & -jx_2\\
0 & r_2 & -(r_3+jx_3) & \ldots-jx_3 & -jx_3\\
0 & 0 & r_3 & \ldots-jx_4 & -jx_4\\
\ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots\\
0 & 0 & 0 & \ldots r_{n-1} & -(r_n+jx_n)
\end{Vmatrix}.\qquad(6\text{-}302)$$

Принимая ток в n-м слое $\dot I_n=1$, можно найти все токи $\dot I_i$ и $\dot I_c$ (в относительных единицах) по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}
&\dot I_{n-1}=\dot I_n\frac{r_n}{r_{n-1}}+j\frac{x_n}{r_{n-1}}\dot I_n;\\
&\dot I_{n-2}=\dot I_{n-1}\frac{r_{n-1}}{r_{n-2}}+j\frac{x_{n-1}}{r_{n-2}}\sum_{n-1}^n\dot I_i;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\dot I_k=\dot I_{k+1}\frac{r_{k+1}}{r_k}+j\frac{x_{k+1}}{r_k}\sum_{k+1}^n\dot I_i;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\dot I_1=\dot I_2\frac{r_2}{r_1}+j\frac{x_2}{r_1}\sum_1^n\dot I_i;\\
&\dot I_c=\sum_1^n\dot I_i.
\end{aligned}\right\}\qquad(6\text{-}303)$$

После решения системы уравнений (6-303) расчет ведется в нижеследующей последовательности.

Активное сопротивление стержня ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока

$$r_{c\xi} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(I_i^2 r_i\right)}{I_c^2}; \qquad (6\text{-}304)$$

коэффициент увеличения активного сопротивления стержня

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(I_i^2 r_i\right)}{I_c^2 r_c}, \qquad (6\text{-}305)$$

где r_c — сопротивление единицы длины стержня при постоянной плотности тока по его сечению, т. е. без учета влияния эффекта вытеснения тока.

Коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого стержнем обмотки с учетом эффекта вытеснения тока

$$\lambda'_{п2\xi} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\lambda_i \left|\sum_{k=n}^{i} \dot{I}_k\right|^2\right)}{I_c^2}. \qquad (6\text{-}306)$$

Коэффициент уменьшения проводимости под влиянием эффекта вытеснения тока

$$k_д = \lambda'_{п2\xi}/\lambda'_{п2},$$

где коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого обмоткой, без учета влияния эффекта вытеснения тока

$$\lambda'_{п2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\lambda_i \left(\sum_{k=n}^{i} q_k\right)^2\right]}{q_c^2}, \qquad (6\text{-}307)$$

где $\sum_{k=n}^{i} q_k$ — сумма площадей поперечных сечений элементарных слоев, расположенных под i-м слоем, для которого рассчитана проводимость λ_i.

Выражение (6-307) может быть использовано только при постоянном в пределах сечения стержня удельном сопротивлении. При различном удельном сопротивлении участков стержня используют следующее выражение:

$$\lambda'_{п2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[\lambda_i \left(\sum_{k=n}^{i} \frac{1}{r_i}\right)^2\right]}{\left(\sum_{i=n}^{i=n} \frac{1}{r_i}\right)^2}, \qquad (6\text{-}308)$$

где $\sum_{k=1}^{i} \frac{1}{r_i}$ — сумма проводимостей на единицу длины элементарных слоев, расположенных ниже i-го слоя;

$\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{r_i} = \frac{1}{r_c}$ — проводимость единицы длины стержня.

Точность описанного метода зависит от принятого числа элементарных слоев n. Достаточная для практических расчетов точность (погрешность в пределах 2—3% от аналитического решения задачи для прямоугольного паза) обеспечивается при числе элементарных слоев $n > 3\xi$, где ξ — приведенная высота стержня по (6-231). Таким образом, при частоте тока $f_2 = 50$ Гц для алюминиевых стержней высотой, например, 30 мм достаточно подразделить стержень на 7—8 элементарных слоев. При этом высота верхних, т. е. находящихся ближе к шлицу слоев, должна быть взята в 3—4 раза меньшей, чем последующих. Токи в элементарных слоях по (6-303) можно рассчитать вручную. При большем числе слоев целесообразно использовать ЭВМ. Программа расчета приведена в приложении I.

Метод предполагает известной картину поля рассеяния в пазу. Если она не известна, то может быть принято добавочное допущение о прямолинейности магнитных силовых линий потока пазового рассеяния, которое является обычным в задачах такого рода. В большинстве случаев картина поля, близ-

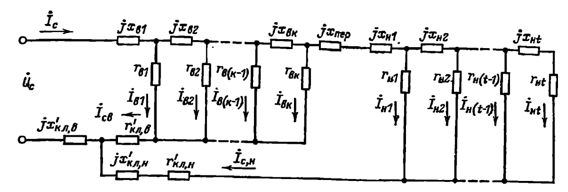


Рис. 6-58. Многозвенная схема замещения цепи двухклеточного ротора с раздельными замыкающими кольцами.

кая к действительной, может быть легко получена моделированием или простым построением поля по известным методам.

Данный метод применим также и к расчету эквивалентных сопротивлений двухклеточных роторов. В этом случае пазы двойной клетки рассматриваются как один сложный паз. Проводимость перемычки между стержнями включается в проводимость верхней магнитной трубки стержня рабочей клетки. При общих замыкающих кольцах их сопротивление учитывается после определения эквивалентного сопротивления стержней $r_{c\xi}$ и $\lambda_{п\xi}$, т. е. так же, как при фигурных пазах. При наличии раздельных замыкающих колец система уравнений и схема замещения несколько усложняются (рис. 6-58), так как приходится учитывать последовательно включенные в каждую из групп параллельных ветвей относящихся к верхней и нижней клеткам сопротивления соответствующих замыкающих колец. Приведенная на рис. 6-58 схема замещения соответствует подразделению верхнего стержня двойной клетки на k и нижнего на t элементарных слоев; $r_{в1}, r_{в2}, \ldots, r_{вk}$ и $x_{в1}, x_{в2}, \ldots, x_{вk}$ — соответственно активные и условные индуктивные сопротивления элементарных слоев верхнего стержня, а $r_{н1}, r_{н2}, \ldots, r_{нt}$ и $x_{н1}, x_{н2}, \ldots, x_{нt}$ — элементарных слоев нижнего стержня; $x_{пер}$ — условное индуктивное сопротивление суженного участка паза (перемычки) между стержнями рабочей и пусковой клетки:

$$x_{пер} = \omega_2\mu_0\lambda_{пер} = \omega_2\mu_0 \frac{h_{пер}}{b_{пер}}, \quad (6\text{-}309)$$

где $h_{пер}$ и $b_{пер}$ — высота и ширина перемычки;

$\dot{I}_{вi}$ и $\dot{I}_{нi}$ — токи в элементарных слоях стержней рабочей и пусковой клеток;

$\dot{I}_{с,в} = \sum_1^k \dot{I}_{вi}$ — ток в стержне пусковой (верхней) клетки;

$\dot{I}_{с,н} = \sum_1^t \dot{I}_{нi}$ — ток в стержне рабочей (нижней) клетки;

$\dot{I}_с$ — ток ротора;

$x'_{кл,в}$ — индуктивное сопротивление, определяемое коэффициентами магнитной проводимости дифференциального и лобового рассеяния пусковой клетки;

$\lambda_{д,в}$ — по (6-174);

$\lambda_{кл,в}$ — по (6-176) или по (6-177);

$x_{кл,н}$ — индуктивное сопротивление лобового рассеяния нижней клетки;

$\lambda_{кл,н}$ — по (6-176) или по (6-177);

$r'_{кл,в}$, $r'_{кл,н}$ — активные сопротивления участков замыкающих колец пусковой и рабочей клеток, приведенные к току ротора:

$$r_{кл,в} = 2r_{кл,в}/\Delta^2; \quad (6\text{-}310)$$

$$r'_{кл,н} = 2r_{кл,н}/\Delta^2. \quad (6\text{-}311)$$

Сопротивление $x_{кл.в}$, вынесенное в общую цепь пусковой и рабочей клеток, учитывает также индуктивную связь колец обеих клеток (см. § 6-12).

Задача определения K_R и K_x обмоток двухклеточного ротора с раздельными замыкающими кольцами решается после определения токов $\dot{I}_i$ схемы замещения (рис. 6-58), что может быть выполнено любым из известных методов решения разветвленных электрических цепей переменного тока. При принятом большом числе элементарных слоев ($n=k+t$) для этой цели целесообразно применять ЭВМ, используя стандартные программы решения комплексных уравнений.

Существенные упрощения достигаются уменьшением числа элементарных слоев до трех-четырех или до двух. При двух элементарных слоях (стержни пусковой и рабочей клеток рассматриваются как элементарные слои) схема замещения (рис. 6-58) трансформируется в схему рис. 6-54 и расчет выполняется по методу, изложенному в § 6-12, однако это снижает точность расчета.

Естественно, что применение данного метода, основанного на подразделении стержня на большое число элементарных слоев, целесообразно лишь при сложных конфигурациях стержней, и при необходимости получить более точный результат, чем по приближенным методам, основанным на допущении о независимости глубины проникновения тока от конфигурации стержней.

Изложенный метод позволяет также учесть влияние неравномерного по площади сечения нагрева стержней в пусковых режимах, что особенно важно для машин, рассчитанных для работы с тяжелыми условиями пуска.

Для этой цели удельное сопротивление каждого элементарного слоя $\rho_{\vartheta i}$ ставится в зависимость от температуры слоя.

Задача решается методом последовательных приближений. После каждого этапа решения по токам $\dot{I}_i$ и принятым удельным сопротивлениям каждого слоя определяют потери в слое и его нагрев за определенный промежуток времени, после чего уточняют значение $\rho_{\vartheta i}$.

В грубом приближении процесс нагрева может быть принят адиабатическим. Более точные результаты дает учет тепловых связей элементарных слоев друг с другом и со сталью зубцов ротора. Решение этой задачи выходит за рамки учебных проектов и в данном курсе не рассматривается.

6-15. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На первоначальной стадии проектирования достаточно достоверную оценку теплового режима двигателя дает приближенный метод теплового расчета, основанный на упрощенном представлении о характере тепловых связей между элементами электрической машины. В нем используются средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции, характерные для определенной конструкции и технологии производства двигателей данного типа.

Для расчета нагрева асинхронных машин, спроектированных на базе серии 4А, могут быть взяты приведенные в [12] усредненные коэффициенты теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции в пазовой и лобовой частях обмоток.

Расчет нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора и фазного ротора несколько увеличивают по сравнению с расчетными, предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры: при классе нагревостойкости изоляции B — до 120°C, при классе нагревостойкости изоляции F — до 140°C и при классе нагревостойкости изоляции H — до 165°C. При

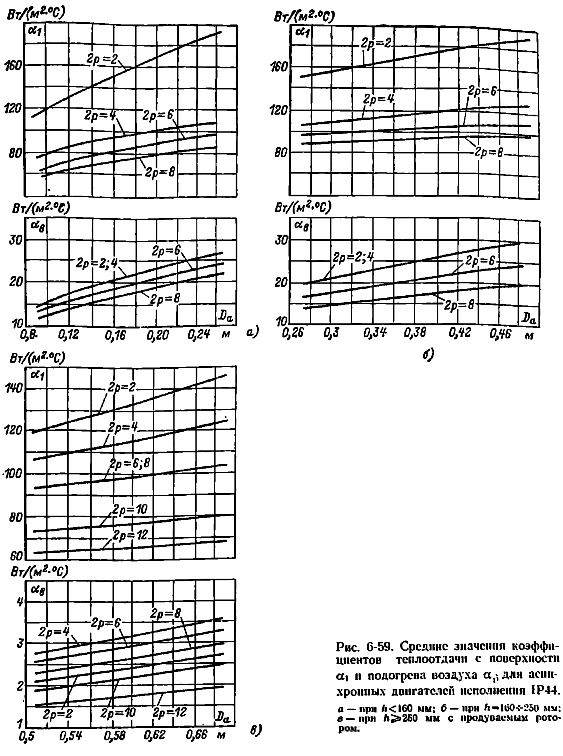


Рис. 6-59. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP44.

а — при $h<160$ мм; *б* — при $h=160\div250$ мм; *в* — при $h\geqslant 260$ мм с продуваемым ротором.

этом коэффициент увеличения потерь $k_р$ по сравнению с полученными для расчетной температуры составит: для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости B $k_р = \rho_{120}/\rho_{75} = 1,15$, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости F $k_р = \rho_{140}/\rho_{115} = 1,07$ и для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости H $k_р = \rho_{165}/\rho_{115} = 1,45$.

Электрические потери в обмотке статора разделяются на потери в пазовой части $P'_{э,п1}$ и потери в лобовых частях катушек $P'_{э,л1}$:

$$P'_{э,п1} = k_р P_{э1} \frac{2l_1}{l_{ср1}}; \quad (6\text{-}312)$$

$$P'_{э,л1} = k_р P_{э1} \frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \quad (6\text{-}313)$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника ста-

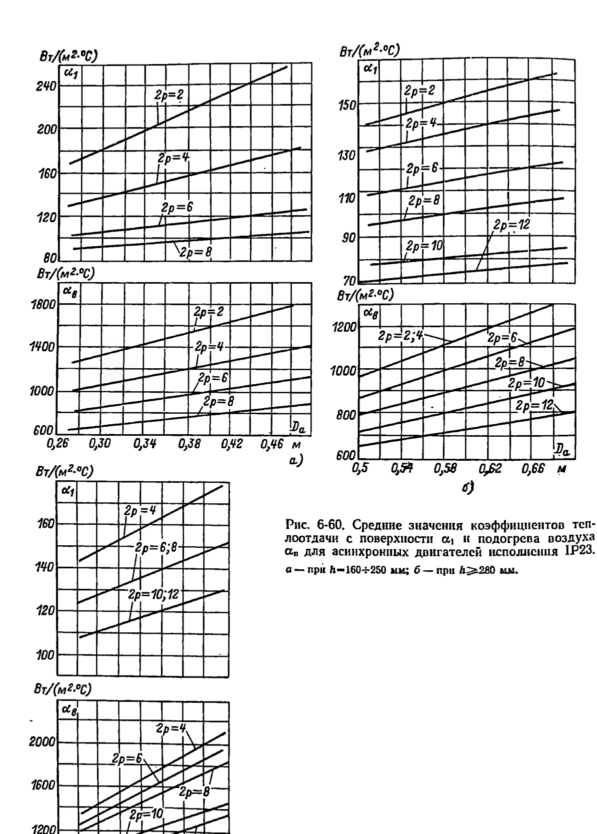


Рис. 6-60. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP23.

а — при $h=160\div250$ мм; *б* — при $h\geqslant280$ мм.

Рис. 6-61. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$ асинхронных двигателей исполнения IP23 при $U=6000$ В.

тора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_{пов1} = K\frac{P'_{э.п1} + P_{ст.осн}}{\pi D l_1 \alpha_1}, \quad (6\text{-}314)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи с поверхности по рис. 6-59—6-61 в зависимости от исполнения машины;

K — коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду (принимают по табл. 6-30).

Таблица 6-30

Средние значения коэффициента K для асинхронных двигателей серии 4А

Исполнение двигателя по способу защиты	Число полюсов двигателя 2p					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.п1} = \frac{P'_{э.п1}}{Z_1 \Pi_{п1} l_1}\left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{экв}}\right), \quad (6\text{-}315)$$

где $\Pi_{п1}$ — расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапецеидальных пазов (см. рис. 6-19, *а*):

$$\Pi_{п1} = 2h_п + b_1 + b_2 \quad (6\text{-}316)$$

($h_п$, b_1, b_2 — размеры паза в штампе); для прямоугольных открытых и полуоткрытых пазов (см. рис. 6-17 и 6-18)

$$\Pi_{п1} = 2(h_п + b_п); \quad (6\text{-}317)$$

$b_{из1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу; для всыпной обмотки $b_{из1}$ берется по соответствующим таблицам (см. гл. 3). Для обмоток из прямоугольного провода

$$b_{из1} = (b_п - n_{эл} b)\,0{,}5, \quad (6\text{-}318)$$

$n_{эл}$ и b — число и ширина неизолированных элементарных проводников, расположенных в одном слое по ширине паза;

$\lambda_{экв}$ — средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции.

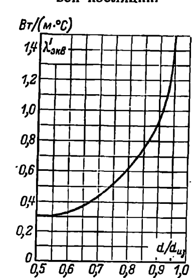


Рис. 6-62. Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции катушек всыпной обмотки из эмалированного провода.

Для классов нагревостойкости В, F и Н: $\lambda_{экв}$=0,16 Вт(м·°С);

$\lambda'_{экв}$ — среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников с учетом неплотности прилегания проводников друг к другу; значение $\lambda'_{экв}$ — по рис. 6-62; для обмоток из прямоугольного провода в (6-315) принимают $\frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{экв}} = 0$.

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}}\left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п1}}{12\lambda'_{экв}}\right), \quad (6\text{-}319)$$

где $\Pi_{л1}$ — периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки; $\Pi_{л1} \approx \approx \Pi_{п1}$;

$b_{\text{из,л}1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки (по таблицам гл. 3). При отсутствии изоляции в лобовых частях $b_{\text{из,л}1}=0$;

$\lambda'_{\text{экв}}$ — для всыпной обмотки по рис. 6-62. Для катушек из прямоугольного провода принимают $\frac{h_{\text{п}1}}{12\lambda'_{\text{экв}}}=0$.

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_{\text{пов,л}1}=\frac{KP'_{\text{э,л}1}}{2\pi D l_{\text{выл}1}\alpha_1}. \quad (6\text{-}320)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta'_1=\frac{(\Delta\vartheta_{\text{пов}1}+\Delta\vartheta_{\text{из,п}1})2l_1+(\Delta\vartheta_{\text{из,л}1}+\Delta\vartheta_{\text{пов,л}1})2l_{\text{л}1}}{l_{\text{ср}1}} \quad (6\text{-}321)$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины. При этом условии

$$\Delta\vartheta_{\text{в}}=\frac{\Sigma P'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}}\alpha_{\text{в}}}, \quad (6\text{-}322)$$

где $\Sigma P'_{\text{в}}$ — сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт;

$\alpha_{\text{в}}$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м²·°С), учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины (рис. 6-59—6-61);

$S_{\text{кор}}$ — эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м².

Для двигателей со степенью защиты IP23

$$\Sigma P'_{\text{в}}=\Sigma P'-(1-K)(P'_{\text{э,л}1}+P_{\text{ст,осн}}), \quad (6\text{-}323)$$

где

$$\Sigma P'=\Sigma P+(k_\rho-1)(P_{\text{э}1}+P_{\text{э}2}); \quad (6\text{-}324)$$

ΣP — сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре;

$$S_{\text{кор}}=\pi D_a(l_1+2l_{\text{выл}1}). \quad (6\text{-}325)$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 при расчете $\Sigma P'_{\text{в}}$ не учитывают также мощность, потребляемую наружным вентилятором, которая составляет примерно 0,9 суммы полных механических потерь:

$$\Sigma P'_{\text{в}}=\Sigma P'-(1-K)(P'_{\text{э,л}1}+P_{\text{ст,осн}})-0{,}9P_{\text{мех}}, \quad (6\text{-}326)$$

где $\Sigma P'$ — по (6-324).

При расчете $S_{\text{кор}}$ учитывают поверхность ребер станины:

$$S_{\text{кор}}=(\pi D_a+8\Pi_{\text{р}})(l_1+2l_{\text{выл}1}), \quad (6\text{-}327)$$

где $\Pi_{\text{р}}$ — условный периметр поперечного сечения ребер станины; значение $\Pi_{\text{р}}$ может быть взято приближенно по кривой рис. 6-63.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_1=\Delta\vartheta'_1+\Delta\vartheta_{\text{в}}. \quad (6\text{-}328)$$

Из-за приближенного характера расчета $\Delta\vartheta_1$ должно быть по крайней мере на 10% меньше, чем допускаемое превышение температуры для принятого класса изоляции (см. табл. 5-1).

Превышение температуры обмотки фазного ротора определяется аналогично в следующей последовательности.

Превышение температуры магнитопровода ротора над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_{\text{пов}2}=\frac{P'_{\text{э,п}2}}{\pi D_2 l_2\alpha_2}, \quad (6\text{-}329)$$

где α_2 — коэффициент теплоот-

дачи с поверхности — по рис. 6-64—6-65;

$P'_{э,п2}$ — электрические потери в пазовой части обмотки ротора:

$$P'_{э,п2} = k_р P_{э2} \frac{2l_2}{l_{ср2}}. \quad (6\text{-}330)$$

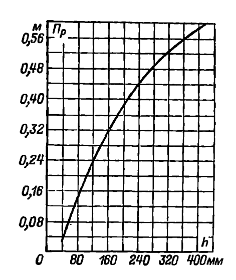


Рис. 6-63. Средние значения периметра поперечного сечения ребер асинхронных двигателей серии 4А.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора, °C,

$$\Delta\vartheta_{из,п2} = \frac{P'_{э,п2}}{Z_2 П_{п2} l_2 \lambda_{экв}}, \quad (6\text{-}331)$$

где $П_{п2}$ — периметр паза ротора. Для прямоугольных пазов

$$П_{п2} = 2(h_{п2} + b_{п2}). \quad (6\text{-}332)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta\vartheta_{пов,л2} = \frac{P'_{э,л2}}{2\pi D_2 b_{выл2} \alpha_2}, \quad (6\text{-}333)$$

где $P'_{э,л2}$ — электрические потери в лобовых частях обмотки, Вт:

$$P'_{э,л2} = k_р P_{э1} \frac{2l_{л2}}{l_{ср2}}. \quad (6\text{-}334)$$

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки ротора, °C,

$$\Delta\vartheta_{из,л2} = \frac{P'_{э,л2} b_{из,л2}}{2Z_2 П_{л2} l_{л2} \lambda_{экв}}, \quad (6\text{-}335)$$

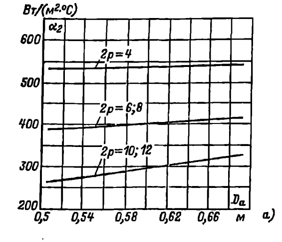
где $П_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки: $П_{л2} = П_{п2}$;

$b_{из,л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовых частей (по табл. гл. 3).

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, °C,

$$\Delta\vartheta'_2 = \frac{(\Delta\vartheta_{пов2} + \Delta\vartheta_{из,п2})\,2l_2 + (\Delta\vartheta_{из,л2} + \Delta\vartheta_{пов,л2})\,2l_{л2}}{l_{ср2}}. \quad (6\text{-}336)$$

Среднее превышение температуры обмотки ротора над окружаю-



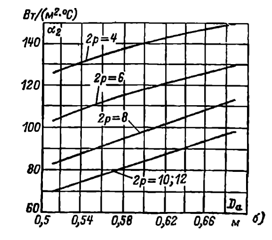


Рис. 6-64. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности фазных роторов асинхронного двигателя с $U_н \leqslant 680$ В.

а — исполнения IP44 с продуваемым ротором; б — исполнения IP23.

щей средой, °С,

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_2' + \Delta\vartheta_п. \qquad (6\text{-}337)$$

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей, так же как и тепловой на первоначальном этапе проектирования, может быть выполнен приближенным методом

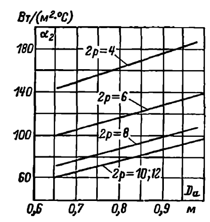


Рис. 6-65. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности фазных роторов асинхронных двигателей с $U_н$=6000 В исполнения IP23.

[12]. Метод заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Для двигателей, спроектированных на базе серии 4А со степенью защиты IP23, требуемый для охлаждения расход воздуха, м³/с,

$$Q_в = \frac{\Sigma P_в'}{1100\Delta\vartheta_в}, \qquad (6\text{-}338)$$

где $\Sigma P_в'$ — по (6-326);

$\Delta\vartheta_в'$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего; приближенно $\Delta\vartheta_в' = 2\Delta\vartheta_в$, где $\Delta\vartheta_в$ — по (6-322).

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя, оценивается по эмпирической формуле

$$Q_в' = m(n_к b_к + 0{,}1)\frac{n}{100}D_a^2, \qquad (6\text{-}339)$$

где $n_к$ и $b_к$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов, м;

n — частота вращения двигателя, об/мин;

m — коэффициент (m=2,6 для двигателя с $2p=2$; m=3-15 для двигателя с $2p\geqslant 4$).

Формула (6-339) приближенно учитывает суммарное действие всех нагнетательных элементов в двигателе: лопаток на замыкающих кольцах литой клетки, вылетов стержней при сварных клетках короткозамкнутых роторов, лобовых частей фазных роторов, вентиляционных распорок в радиальных каналах и др.

Для двигателей со степенью защиты IP44 требуемый для охлаждения расход воздуха, м³/с,

$$Q_в = \frac{k_m \Sigma P_в'}{1100\Delta\vartheta_в}, \qquad (6\text{-}340)$$

где k_m — коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_m = m\sqrt{\frac{n}{100}D_a}. \qquad (6\text{-}341)$$

Коэффициент m=2,6 для двигателей с $2p=2$ при $h\leqslant 132$ мм и m=3,3 при $h\geqslant 160$ мм; m=1,8 для двигателей с $2p\geqslant 4$ при $h\leqslant 132$ мм и m=2,5 при $h\geqslant 160$ мм.

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором при конструктивном исполнении и размерах, принятых в двигателях серии 4А, может быть приближенно определен по следующей формуле:

$$Q_в' = 0{,}6D_a^3\frac{n}{100}. \qquad (6\text{-}342)$$

Расход воздуха $Q_в'$ должен быть больше требуемого для охлаждения машины $Q_в$.

6-16. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

а) Расчет двигателя с короткозамкнутым ротором

Техническое задание

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором: P_2=15 кВт, n_1=1500 об/мин; U=220/380 В; конструктивное исполнение

1М1001; исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды IP44; категория климатического исполнения У3.

1. Число пар полюсов $p = 60f/n_1 = 60 \times 50/1500 = 2$.

Выбор главных размеров

2. Высота оси вращения (предварительно) по рис. 6-7, *а* $h = 150$ мм.

Из табл. 6-6 принимаем ближайшее меньшее значение $h = 132$ мм и $D_a = 0,225$ м.

3. Внутренний диаметр статора $D = K_D D_a = 0,68 \cdot 0,225 = 0,153 \approx 15 \cdot 10^{-3}$ м [$K_D = 0,68$ по табл. 6-7].

4. Полюсное деление $\tau = \pi D/2p = \pi \times 150 \cdot 10^{-3}/4 = 118 \cdot 10^{-3}$ м.

5. Расчетная мощность по (6-4)

$$P = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi} = 15 \cdot 10^3 \frac{0,97}{0,89 \cdot 0,88} = $$

$$= 18\,578 \approx 18\,600 \text{ Вт}$$

[k_E — по рис. 6-8; η и $\cos\varphi$ — — по рис. 6-9, *а*],

6. Электромагнитные нагрузки (предварительно) по рис. 6-11, *а*

$$A = 27,2 \cdot 10^3 \text{ А/м}; \quad B_\delta = 0,88 \text{ Тл}.$$

7. Обмоточный коэффициент для однослойной обмотки (предварительно) $k_{об1} = 0,95$.

8. Расчетная длина воздушного зазора по (6-6)

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B D^2 \Omega k_{об1} A B_\delta} =$$

$$= \frac{18\,600}{1,11 \cdot 0,150^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 27,2 \cdot 10^3 \cdot 0,88} =$$

$$= 0,209 \approx 0,21 \text{ м}$$

[по (6-5) $\Omega = 2\pi n_1/60 = 2\pi \cdot 1500/60 = 157$ рад/с].

9. Отношение $\lambda = l_\delta/\tau = 0,2/0,118 = 1,78$.

Полученное значение λ выше рекомендуемых пределов (рис. 6-14, *а*), поэтому принимаем следующую бóльшую из стандартного ряда (табл. 6-6) высоту оси вращения $h = 160$ мм. Повторяем расчеты по пп. 2—9:

$$D_a = 0,272 \text{ м}; \quad D = 0,68 \cdot 0,272 = 0,185 \text{ м};$$

$$\tau = \pi \cdot 0,185/4 = 0,145 \text{ м}; \quad k_E = 0,975;$$

$$P' = \frac{15 \cdot 10 \cdot 0,975}{0,89 \cdot 0,88} = 18\,673 \approx 18\,670 \text{ Вт};$$

$$A = 33,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}; \quad B_\delta = 0,76 \text{ Тл};$$

$$l_\delta = \frac{18\,670}{1,11 \cdot 0,185^2 \cdot 157 \cdot 0,95 \cdot 33,5 \cdot 10^3 \cdot 0,76} =$$

$$= 0,1294 \approx 0,130 \text{ м};$$

$$\lambda = \frac{0,130}{0,145} = 0,9.$$

Значение $\lambda = 0,9$ находится в рекомендуемых пределах.

Определение Z_1, w_1 и сечения провода обмотки статора

10. Предельные значения t_1 (по рис. 6-15) $t_{1max} = 14$ мм; $t_{1min} = 12$ мм.

11. Число пазов статора по (6-16)

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{1max}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,014} = 41;$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{1min}} = \frac{\pi \cdot 0,185}{0,012} = 48.$$

Принимаем $Z_1 = 48$, тогда $q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4$. Обмотка однослойная.

12. Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_1 = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 0,185}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 12,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

13. Число эффективных проводников в пазу [предварительно, при условии $a = 1$ по (6-17)]:

$$u'_п = \frac{\pi D A}{I_{1н} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,185 \cdot 33,5 \cdot 10^3}{29 \cdot 48} = 14$$

[по (6-18)

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m U_{1н} \cos \varphi \eta} =$$

$$= \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,89} = 29\text{А}\Big].$$

14. Принимаем $a = 2$, тогда по (6-19) $u_п = a\, u'_п = 2 \cdot 14 = 28$.

15. Окончательные значения по (6-20)

$$w_1 = \frac{u_п Z_1}{2am} = \frac{28 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 112;$$

[по (6-21)

$$A = \frac{2 I_{1н} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 29 \cdot 112 \cdot 3}{\pi \cdot 0,185} =$$

$$= 33,5 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

по (6-22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1н}}{4 k_B w_1 k_{об1} f_1} =$$

$$= \frac{0,975 \cdot 220}{4,44 \cdot 112 \cdot 0,958 \cdot 50} = 9,005 \cdot 10^{-3} \approx$$

$$\approx 9,01 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

[для однослойной обмотки с $q = 4$ по табл. 3-13: $k_{об1} = k_р = 0,958$; для $D_a = 272$ мм по рис. 6-8: $k_E = 0,975$].

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{2 \cdot 9,01 \cdot 10^{-3}}{0,185 \cdot 0,13} =$$

$$= 0,749 \text{ Тл [по (6-23)]}.$$

Значения A и B_δ находятся в допустимых пределах (см. рис. 6-11, *б*).

16. Плотность тока в обмотке статора (предварительно) по (6-25)

$$J_1 = \frac{(AJ_1)}{A} = \frac{183\cdot 10^9}{33,5\cdot 10^3} = 5,46\cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

[$(AJ_1) = 183\cdot 10^9$ А²/м³ по рис. 6-16, б].

17. Сечение эффективного проводника (предварительно) по (6-24)

$$q_{эф} = \frac{I_{1н}}{aJ_1} = \frac{29}{2\cdot 5,46\cdot 10^6} =$$

$$= 2,66\cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 2,66 \text{ мм}^2;$$

принимаем $n_{эл}=2$, тогда $q_{эл}=0,5q_{эф}=0,5\times$ $\times 2,66=1,33$ мм². Обмоточный провод ПЭТМ (по табл. П-28): $d_{эл}=1,25$ мм; $q_{эл}=$ $=1,227$ мм², $q_{эф}=1,227\cdot 2=2,454$ мм², $d_{из}=$ $=1,33$ мм².

18. Плотность тока в обмотке статора (окончательно) по (6-27)

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{aq_{эл}n_{эл}} = \frac{29}{2\cdot 1,227\cdot 10^{-6}\cdot 2} =$$

$$= 5,91\cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 5,91 \text{ А/мм}^2.$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора — по рис. 6-19, а с соотношением размеров, обеспечивающим параллельность боковых граней зубцов.

19. Принимаем предварительно по табл. 6-10: $B_{z1}=1,9$ Тл; $B_a=1,6$ Тл, тогда по (6-39)

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{B_{z1} l_{ст1} k_c} = \frac{0,749\cdot 12,1\cdot 10^{-3}\cdot 0,13}{1,9\cdot 0,130\cdot 0,97} =$$

$=4,9$ мм [по табл. 6-11 для оксидированных листов стали $k_c=0,97$];

по (6-28)

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{ст1} k_c} = \frac{9,01\cdot 10^{-3}}{2\cdot 1,6\cdot 130\cdot 10^{-3}\cdot 0,97} =$$

$$= 0,0223 \text{ м} = 22,3 \text{ мм}.$$

20. Размеры паза в штампе принимаем $b_ш=3,7$ мм; $h_ш=1$ мм:

по (6-40)

$$h_п = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{272-185}{2} -$$

$$- 22,3 = 21,2 \text{ мм};$$

по (6-41)

$$b_1 = \frac{\pi(D+2h_п)}{Z_1} - b_{z1} =$$

$$= \frac{\pi(185+2\cdot 21,2)}{48} - 4,9 = 10 \text{ мм};$$

по (6-42)

$$b_2 = \frac{\pi(D+2h_ш-b_ш) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} =$$

$$= \frac{\pi(185+2-3,7) - 48\cdot 4,9}{48-\pi} =$$

$$= 7,59 \approx 7,6 \text{ мм};$$

по (6-45), (6-46)

$$h_1 = h_п - \left(h_ш + \frac{b_2 - b_ш}{2}\right) = 21,2 -$$

$$- \left(1 + \frac{7,6-3,7}{2}\right) = 18,25 \approx 18,3 \text{ мм}.$$

21. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку по (6-47):

$$b_1' = b_1 - \Delta b_п = 10 - 0,2 = 9,8 \text{ мм};$$

$$b_2' = b_2 - \Delta b_п = 7,6 - 0,2 = 7,4 \text{ мм};$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_п = 18,3 - 0,2 = 18,1 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников по (6-51)

$$S_п' = \frac{b_1' + b_2'}{2} h_1' - S_{из} - S_{пр} =$$

$$= \frac{9,8+7,4}{2}\cdot 18,1 - 24 = 131,7 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения прокладок $S_{пр}=0$.

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу $S_{из}=b_{из}(2h_п+b_1+$ $+b_2)=0,4(2\cdot 21,2+10+7,6)=24$ мм², где односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{из}=0,44$ мм — по табл. 3-8.

22. Коэффициент заполнения паза

$$k_з = \frac{d_{из}^2 u_п n_{эл}}{S_п'} = \frac{1,33^2\cdot 28\cdot 2}{131,7} = 0,752.$$

Полученное значение $k_з$ для механизированной укладки обмотки чрезмерно велико. Снизить $k_з$, не изменяя главных размеров двигателя, можно либо уменьшив $u_п$ при тех же размерах паза, либо увеличив площадь поперечного сечения паза. В первом случае, уменьшая $u_п$ с 28 по 27, получаем:

$$k_з = 0,752\frac{27}{28} = 0,725; \; B_\delta = 0,749\frac{28}{27} =$$

$$= 0,776 \text{ Тл}; \; B_z = 1,9\frac{28}{27} = 1,97 \text{ Тл};$$

$$B_a = 1,6\frac{28}{27} = 1,66 \text{ Тл}.$$

Более удачным решением будет увеличение размеров паза.

Принимаем $B_z=1,95$ Тл и $B_a=1,65$ Тл, что допустимо, так как эти значения превышают рекомендуемые в табл. 6-10 только на 2,5—3%.

23. Повторяем расчет по пп. 19—21.

$$b_{z1} = \frac{0,749\cdot 12,1\cdot 10^{-3}\cdot 0,13}{1,95\cdot 0,13\cdot 0,97} =$$

$$= 0,00479 \text{ м} \approx 4,8 \text{ мм};$$

$$h_a = \frac{9,01\cdot 10^{-3}}{2\cdot 1,65\cdot 0,13\cdot 0,97} =$$

$$= 0,0217 \text{ м} = 21,7 \text{ мм};$$

$$h_п = \frac{272 - 185}{2} - 21,7 = 21,8 \text{ мм};$$

$$b_1 = \frac{\pi(185 + 2 \cdot 21,8)}{48} - 4,8 = 10,2 \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi(185 + 2 - 3,7) - 48 \cdot 4,8}{48 - \pi} = 7,7 \text{ мм};$$

$$h_1 = 21,8 - \left(1 + \frac{7,7 - 3,7}{2}\right) = 18,8 \text{ мм}.$$

Размеры паза в свету:

$$b_1' = 10,2 - 0,2 = 10 \text{ мм};$$

$$b_2' = 7,7 - 0,2 = 7,5 \text{ мм};$$

$$h_1' = 18,8 - 0,2 = 18,6 \text{ мм}.$$

Площадь поперечного сечения паза в свету для размещения проводников обмотки

$$S_п' = \frac{10 + 7,5}{2} \cdot 18,6 - 24,6 = 138,15 \text{ мм}^2,$$

где $S_{из} = 0,4(2 \cdot 21,8 + 10,2 + 7,7) = 24,6$ мм².

24. Коэффициент заполнения паза

$$k_з = \frac{1,33^2 \cdot 28 \cdot 2}{138,15} = 0,717 \cong 0,72.$$

Размеры паза в штампе показаны на рис. 6-66, *а*.

Расчет ротора

25. Воздушный зазор (по рис. 6-21) $\delta = 0,5$ мм.

26. Число пазов ротора (по табл. 6-15) $Z_2 = 38$.

27. Внешний диаметр $D_2 = D - 2\delta = 0,185 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,184$ м.

28. Длина $l_2 = l_1 = 0,13$ м.

29. Зубцовое деление

$$t_2 = \pi D_2/Z_2 = \pi \cdot 0,184/38 \approx$$
$$\approx 0,0152 \text{ м} \approx 15,2 \text{ мм}.$$

30. Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал, по (6-101)

$$D_j = D_в = k_в D_a = 0,23 \cdot 0,272 =$$
$$= 0,0626 \text{ м} = 60 \text{ мм}$$

($k_в$ — по табл. 6-16).

31. Ток в стержне ротора по (6-60)

$$I_2 = k_i I_1 \nu_i = 0,9 \cdot 29 \cdot 16,94 = 442 \text{ А}$$

[$k_i = 0,9$—по рис. 6-22;

$$\nu_i = \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 112 \cdot 0,958}{38} =$$
$$= 16,94 \text{ по (6-68)}].$$

32. Площадь поперечного сечения стержня по (6-69)

$$q_с = \frac{I_2}{J_2} = \frac{442}{2,5 \cdot 10^6} = 176,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 =$$
$$= 176,8 \text{ мм}^2$$

[плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 2,5 \cdot 10^6$ А/м²].

33. Паз ротора — по рис. 6-27, *б*. Принимаем $b_ш = 1,5$ мм; $h_ш = 0,7$ мм; $h_ш' = 0,3$ мм.

Допустимая ширина зубца по (6-77)

$$b_{z2доп} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{B_{z2} l_{ст2} k_с} =$$
$$= \frac{0,749 \cdot 15,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,13}{1,8 \cdot 0,13 \cdot 0,97} =$$
$$= 6,52 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6,5 \text{ мм}.$$

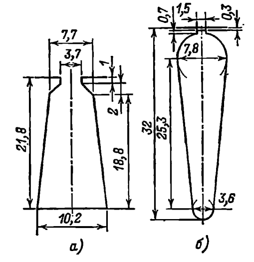


Рис. 6-66. Пазы спроектированного двигателя, $P_2 = 15$ кВт, $2p = 4$, $U = 220/380$ В.
а — статора; *б* — ротора.

Размеры паза:
по (6-74)

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_ш - 2h_ш') - Z_2 b_{z2}}{\pi + Z_2} =$$
$$= \frac{\pi(184 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 6,5}{\pi + 38} =$$
$$= 7,9 \text{ мм};$$

по (6-75)

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2\left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{q_с}{4}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{7,9^2\left(\frac{38}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - \frac{176,8}{4}}{\frac{38}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} =$$
$$= 3,72 \text{ мм};$$

по (6-76)

$$h_1 = (b_1 - b_2)\frac{Z_2}{2\pi} =$$
$$= (7,9 - 3,72)\frac{38}{2\pi} = 25,28 \text{ мм}.$$

Принимаем (см. рис. 6-66, б) $b_1 = 7{,}8$ мм; $b_2 = 3{,}6$ мм; $h_1 = 25{,}3$ мм.

Полная высота паза

$$h_{п2} = h'_ш + h_ш + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} =$$

$$= 0{,}3 + 0{,}7 + \frac{7{,}8}{2} + 25{,}3 + \frac{3{,}6}{2} = 32 \text{ мм}.$$

Сечение стержня по (6-78)

$$q_c = \frac{\pi}{8}\left(b_1^2 + b_2^2\right) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2) h_1 =$$

$$= \frac{\pi}{8}(7{,}8^2 + 3{,}6^2) + \frac{1}{2}(7{,}8 + 3{,}6) \times$$

$$\times 25{,}3 = 173{,}2 \text{ мм}^2.$$

34. Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{442}{173{,}2 \cdot 10^{-6}} = 2{,}55 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

35. Короткозамыкающие кольца (см. рис. 6-26). Площадь поперечного сечения по (6-73)

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{1343}{2{,}17 \cdot 10^6} = 618{,}9 \text{ мм}^2$$

$$\left[I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{442}{0{,}329} = 1343 \text{ А},\right.$$

$$\text{где } \Delta = 2 \sin \frac{\alpha_z}{2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} =$$

$$= 0{,}329 \text{ — по (6-71) и (6-72)};$$

$$J_{кл} = 0{,}85 J_2 = 0{,}85 \cdot 2{,}55 \cdot 10^6 =$$

$$\left.= 2{,}17 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2\right].$$

Размеры замыкающих колец:

$$b_{кл} = 1{,}25 h_{п2} = 1{,}25 \cdot 32 = 40 \text{ мм};$$

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{618{,}9}{40} \approx 15{,}5 \text{ мм};$$

$$q_{кл} = b_{кл} a_{кл} = 40 \cdot 15{,}5 = 620 \text{ мм}^2;$$

$$D_{к,ср} = D_2 - b_{кл} = 184 - 40 = 144 \text{ мм}.$$

Расчет намагничивающего тока

36. Значения индукций:

по (6-104)

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{b_{z1} l_{ст1} k_c} =$$

$$= \frac{0{,}749 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}13}{4{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}97} = 1{,}93 \text{ Тл};$$

по (6-104)

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2} l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{0{,}749 \cdot 15{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}13}{6{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}97} = 1{,}805 \text{ Тл};$$

по (6-105)

$$B_a = \frac{\Phi}{2 h_a l_{ст1} k_c} = \frac{9{,}01 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 21{,}7 \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}97} =$$

$$= 1{,}65 \text{ Тл};$$

по (6-107)

$$B_j = \frac{\Phi}{2 h'_j l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{9{,}01 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 37{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}13 \cdot 0{,}97} = 0{,}95 \text{ Тл}$$

[расчетная высота ярма ротора по (6-109)

$$h_j = \frac{2 + p}{3{,}2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{п2}\right) - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2} =$$

$$= \left.\frac{2 + 2}{3{,}2 \cdot 2}\left(\frac{184}{2} - 32\right) = 37{,}5 \text{ мм}\right].$$

37. Магнитное напряжение воздушного зазора по (6-110)

$$F_\delta = 1{,}59 \cdot 10^6 B_\delta k_\delta \delta = 1{,}59 \cdot 10^6 \cdot 0{,}749 \times$$

$$\times 1{,}22 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 727{,}16 \text{ А}$$

$$\left[k_\delta = \frac{t_1}{t_1 - \gamma\delta} = \frac{12{,}1}{12{,}1 - 4{,}42 \cdot 0{,}5} =\right.$$

$$= 1{,}22, \text{ где по (4-14)}$$

$$\left.\gamma = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta} = \frac{(3{,}7/0{,}5)^2}{5 + 3{,}7/0{,}5} = 4{,}42\right].$$

38. Магнитные напряжения зубцовых зон: статора по (6-111)

$$F_{z1} = 2 h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 21{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 2340 =$$

$$= 102{,}02 \text{ А};$$

ротора по (6-113)

$$F_{z2} = 2 h_{z2} H_{z2} = 2 \cdot 31{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 1540 = 97{,}33 \text{ А}$$

[по табл. П-15,в для стали 2013 $H_{z1} = 2340$ А/м при $B_{z1} = 1{,}93$ Тл; $H_{z2} = 1540$ А/м при $B_{z2} = 1{,}805$ Тл; $h_{z1} = h_{п1} = 21{,}8$ мм, $h_{z2} = h_{п2} - 0{,}1\ b_2 = 32 - 0{,}1 \cdot 3{,}6 = 31{,}6$ мм].

39. Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (6-120)

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 +$$

$$+ \frac{102{,}02 + 97{,}33}{727{,}16} = 1{,}27.$$

40. Магнитные напряжения ярм статора и ротора:

по (6-121)

$$F_a = L_a H_a = 0{,}1966 \cdot 940 = 184{,}8 \text{ А};$$

по (6-123)

$$F_j = L_j H_j = 0{,}071 \cdot 168 = 11{,}93 \text{ А}$$

[по табл. П-16 $H_a = 940$ А/м при $B_a = 1{,}65$ Тл; $H_j = 168$ А/м при $B_j = 0{,}95$ Тл];

по (6-122)

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi(0{,}272 - 0{,}0217)}{4} =$$

$$= 0{,}1966 \text{ м};$$

по (6-124)

$$L_j = \frac{\pi\left(D_b + h'_j\right)}{2p} = \frac{\pi(0{,}06 + 0{,}03)}{4} =$$

$$= 0{,}071 \text{ м},$$

где по (6-125)

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} =$$

$$= \frac{184 - 60}{2} - 32 = 30 \text{ мм}\Big].$$

41. Магнитное напряжение на пару полюсов по (6-127)

$$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j =$$

$$= 727,2 + 102,10 + 97,3 + 184,8 +$$

$$+ 11,9 = 1123,2 \text{ А}.$$

42. Коэффициент насыщения магнитной цепи по (6-128)

$$k_\mu = \frac{F_ц}{F_\delta} = \frac{1123,2}{727,2} = 1,56.$$

43. Намагничивающий ток по (6-129)

$$I_\mu = \frac{pF_ц}{0,9mw_1k_{об1}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 1123,25}{0,9 \cdot 3 \cdot 112 \cdot 0,958} = 7,75 \text{ А};$$

относительное значение по (6-130)

$$I_{\mu*} = \frac{I_\mu}{I_{1н}} = \frac{7,75}{29} = 0,27.$$

Параметры рабочего режима

44. Активное сопротивление фазы обмотки статора по (6-131)

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{эф}\, a} = \frac{10^{-6} \cdot 80,86}{41 \cdot 2,454 \cdot 10^{-6} \cdot 2} =$$

$$= 0,402 \text{ Ом}.$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная $\vartheta_{расч} = 115°$C. Для меди $\rho_{115} = 10^{-6}/41$ Ом·м.

Длина проводников фазы обмотки по (6-133)

$$L_1 = l_{ср1}\, w_1 = 0,722 \cdot 112 = 80,86 \text{ м}$$

[по (6-134): $l_{ср1} = 2\,(l_{п1} + l_{л1}) = 2\,(0,13 + 0,231) = 0,722$ м;

$$l_{п1} = l_1 = 0,13 \text{ м}; \; l_{л1} = K_л\, b_{кт} + 2B =$$

$$= 1,3 \cdot 0,162 + 2 \cdot 0,01 = 0,231 \text{ м},$$

где $B = 0,01$ м; по табл. 6-19; $K_л = 1,3$;

$$b_{кт} = \frac{\pi\,(D + h_{п1})}{2p}\, \beta_1 =$$

$$= \frac{\pi\,(0,185 + 0,0218)}{4} = 0,162 \text{ м}\Big].$$

Длина вылета лобовой части катушки

$$l_{выл} = K_{выл}\, b_{кт} + B = 0,4 \cdot 0,162 +$$

$$+ 0,01 = 0,0748 \text{ м} = 74,8 \text{ мм},$$

где по табл. 6-19 $K_{выл} = 0,4$.

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,402\, \frac{29}{220} = 0,053.$$

45. Активное сопротивление фазы обмотки ротора по (6-164)

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = 36,61 \cdot 10^{-6} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 0,937 \cdot 10^{-6}}{0,329^2} = 53,92 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$\Big[\text{по (6-165) } r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{q_c} =$$

$$= \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,13}{173,2 \cdot 10^{-6}} = 36,61 \cdot 10^{-6} \text{ Ом};$$

$$\text{по (6-166) } r_{кл} = \rho_{115} \frac{\pi D_{кл.ср}}{Z_2 q_{кл}} =$$

$$= \frac{10^{-6}}{20,5}\, \frac{\pi 0,144}{38 \cdot 620 \cdot 10^{-6}} = 0,937 \cdot 10^{-6} \text{ Ом},$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом·м}\Big].$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по (6-169):

$$r_2' = r_2 \frac{4m\,(wk_{об1})^2}{Z_2} =$$

$$= 53,92 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3\,(112 \cdot 0,958)^2}{38} = 0,196 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,196 \cdot \frac{29}{220} = 0,0258.$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (4-42)

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta'}{pq} (\lambda_п + \lambda_{л1} +$$

$$+ \lambda_{д1}) = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{112}{100}\right)^2 \times$$

$$\times \frac{0,13}{24} (1,48 + 1,45 + 1,57) = 0,725 \text{ Ом},$$

где по табл. 6-22 (рис. 6-38, *ж*)

$$\lambda_п = \frac{h_3}{3b}\, k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b + 2b_ш} +\right.$$

$$\left. + \frac{h_ш}{b_ш}\right) k_\beta' = \frac{18,8}{3 \cdot 7,7} + \frac{3 \cdot 2}{7,7 + 2 \cdot 3,7} +$$

$$+ \frac{1}{3,7} = 1,48, \text{ где (см. рис. 6-66)}$$

$$h_3 = 18,8 \text{ мм}; \; b = 7,7 \text{ мм}; \; h_2 = 0;$$

$$h_1 = \frac{7,7 - 3,7}{2} = 2 \text{ мм};$$

$$k_\beta = 1; \; k_\beta' = 1, \; l_\delta' = l_\delta = 0,13 \text{ м} -$$

— по (6-155).

По (6-154)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q}{l_\delta'} (l_л - 0,64\beta\tau) =$$

$$= 0,34 \frac{4}{0,13} (0,231 - 0,64 \cdot 0,145) = 1,45;$$

по (6-170)

$$\lambda_{д1}=\frac{t_1}{12\delta k_\delta}\xi=\frac{12,1}{12\cdot 0,5\cdot 1,22}0,95=1,57$$

$$\Big[\text{по (6-172) } \xi=2k'_{ск}k_\beta-k^2_{об1}\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2\times$$

$$\times\left(1+\beta^2_{ск}\right)=2\cdot 1,2-0,958^2\left(\frac{15,2}{12,1}\right)^2=$$

$$=0,95;$$

для $\beta_{ск}=0$ и $t_2/t_1=15,2/12,1=1,26$ по рис. 6-39, $\partial\cdot k'_{ск}=1,2$].

Относительное значение

$$x_{1*}=x_1\frac{I_{1н}}{U_{1н}}=0,725\frac{29}{220}=0,096.$$

47. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (6-173)

$$x_2=7,9f_1\,l'_\delta(\lambda_{п2}+\lambda_{л2}+\lambda_{д2})\cdot 10^{-6}=$$

$$=7,9\cdot 50\cdot 0,13(2,76+0,61+2,08)=$$

$$=279,9\cdot 10^{-6}\text{ Ом},$$

где по табл. 6-23 (рис. 6-40, *а, и*)

$$\lambda_{п2}=\left[\frac{h_1}{3b}\left(1-\frac{\pi b^2}{8q_c}\right)+0,66-\frac{b_ш}{2b}\right]k_д+$$

$$+\frac{h_ш}{b_ш}+1,12\frac{h'_ш\cdot 10^6}{I_2}=$$

$$=\frac{30,64}{3\cdot 7,8}\left(1-\frac{\pi 7,8^2}{8\cdot 173,2}\right)^2+0,66-\frac{1,5}{2\cdot 7,8}+$$

$$+\frac{0,7}{1,5}+1,12\frac{0,3\cdot 10^{-3}\cdot 10^6}{442}=2,76$$

[$h_1=32-0,3-0,7-0,2\cdot 1,8=30,64$ мм;

$b=7,8$ мм; $b_ш=1,5$ мм;

$k_д=1$ (для рабочего режима)];

$l'_\delta=l_\delta=0,13$м — по (6-156);

по (6-176)

$$\lambda_{л2}=\frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2\,l'_\delta\,\Delta^2}\lg\frac{4,7D_{кл.ср}}{a_{кл}+2b_{кл}}=$$

$$=\frac{2,3\cdot 0,144}{38\cdot 0,13\cdot 0,329^2}\lg\frac{4,7\cdot 0,144}{2\cdot 0,04+0,0155}=$$

$$=0,61;$$

по (6-174)

$$\lambda_{д2}=\frac{t_2}{12\delta k_\delta}\xi=\frac{15,2}{12\cdot 0,5\cdot 1,22}=2,08$$

$$\Big[\text{по (6-175) } \xi=1+\frac{1}{5}\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)^2-$$

$$-\frac{\Delta_z}{1-\left(\frac{p}{Z_2}\right)^2}\approx 1,\quad\text{так как } \frac{1}{5}\left(\frac{\pi\cdot 2}{38}\right)^2\approx$$

$$\approx 0\text{ и }\Delta_z\approx 0\Big];$$

$$\Sigma\lambda_2=\lambda_{п2}+\lambda_{л1}+\lambda_{д1}=2,76+$$

$$+0,61+2,08=5,45.$$

Приводим x_2 к числу витков статора по (6-178):

$$x'_2=x_2\frac{4m(w_1k_{об1})^2}{Z_2}=$$

$$=279,9\cdot 10^{-6}\frac{4\cdot 3\cdot(112\cdot 0,958)^2}{38}=1,02\text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$x'_{2*}=x'_2\frac{I_{1н}}{U_{1н}}=1,02\frac{29}{220}=0,134.$$

Расчет потерь

48. Потери в стали основные по (6-183)

$$P_{ст,осн}=p_{1,0/5,0}\left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta\times$$

$$\times\left(k_{да}B^2_a m_a+k_{дz}B^2_{z1}m_{z1}\right)=$$

$$=2,6(1,6\cdot 1,65^2\cdot 16,78+$$

$$+1,8\cdot 1,81^2\cdot 5,27)=270,8\text{ Вт}$$

[$p_{1,0/5,0}=2,6$ Вт/кг и $\beta=1,5$ для стали 2013 по табл. 6-24];

по (6-184)

$$m_a=\pi(D_a-h_a)h_a\,l_{ст1}\,k_c\,\gamma_c=$$

$$=\pi(0,272-0,0217)\cdot 0,0217\cdot 0,13\times$$

$$\times 0,97\cdot 7,8\cdot 10^3=16,78\text{ кг},$$

где $h_a=0,5(D_a-D)-h_{ш1}=0,5(0,272-$
$-0,185)-0,0218=0,0217;$

по (6-185)

$$m_{zi}=h_{z1}b_{z1ср}Z_1\,l_{ст1}\,k_c\,\gamma_c=$$

$$=21,8\cdot 10^{-3}\cdot 4,8\cdot 10^{-3}\cdot 48\cdot 0,13\times$$

$$\times 0,97\cdot 7,8\cdot 10^3=4,94\text{ кг}.$$

49. Поверхностные потери в роторе по (6-190)

$$P_{пов2}=p_{пов2}(t_2-b_{ш2})Z_2l_{ст2}=$$

$$=242,4\cdot 15,2\cdot 10^{-3}\cdot 38\cdot 0,13=18,2\text{ Вт};$$

по (6-188)

$$p_{пов2}=0,5k_{02}\left(\frac{Z_1n_1}{10\,000}\right)^{1,5}(B_{02}t_1\cdot 10^3)^2=$$

$$=0,5\cdot 1,5\left(\frac{48\cdot 1500}{10\,000}\right)^{1,5}(0,338\cdot 12,1)^2=$$

$$=242,4\text{ Вт/м}^2,$$

где $k_{02}=1,5$;

по (6-186)

$$B_{02}=\beta_{02}k_\delta B_\delta=0,37\cdot 1,22\cdot 0,749=0,338;$$

для $\frac{b_ш}{\delta}=\frac{3,7}{0,5}=7,4$ по рис. 6-41 $\beta_{02}=0,37$.

50. Пульсационные потери в зубцах ротора по (6-196)

$$P_{пуль2} = 0,11\left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{пуль2}\right)^2 m_{z2} =$$

$$= 0,11\left(\frac{48\cdot 1500}{1000} 0,131\right)^2\cdot 7,77 = 69,1 \text{ Вт}$$

[по (6-192)

$$B_{пуль2} = \frac{\gamma\delta}{2t_2} B_{z2ср} =$$

$$= \frac{4,42\cdot 0,5\cdot 10^{-3}}{2\cdot 15,2\cdot 10^{-3}} 1,805 = 0,131 \text{ Тл};$$

$\gamma=4,42$ из п. 37 расчета;
по (6-197)

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2ср} l_{ст2} k_c \gamma_c =$$

$$= 38\cdot 32\cdot 10^{-3}\cdot 6,5\cdot 10^{-3}\cdot 0,13 \times$$

$$\times 0,97\cdot 7800 = 7,77 \text{ кг}].$$

51. Сумма добавочных потерь в стали по (6-198):

$$P_{ст.доб} = P_{пов2} + P_{пуль2} =$$

$$= 18,2 + 69,1 = 87,3 \text{ Вт}.$$

52. Полные потери в стали по (6-199)

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} =$$

$$= 270,8 + 87,3 = 358,1 \text{ Вт}.$$

53. Механические потери по (6-205)

$$P_{мех} = K_т\left(\frac{n}{10}\right)^2 D_a^4 =$$

$$= 0,95\left(\frac{1500}{10}\right)^2\cdot 0,272^4 = 117 \text{ Вт}$$

[для двигателей $2p=4$ коэффициент $K_т = 1,3\ (1-D_a) = 1,3(1-0,272) = 0,95$].

54. Добавочные потери при номинальном режиме

$$P_{доб.н} = 0,005 P_{1н} = 0,005\frac{P_{2н}}{\eta} =$$

$$= 0,005\frac{15\,000}{0,89} = 84,3 \text{ Вт}.$$

55. Холостой ход двигателя:
по (6-212)

$$I_{х.х} \approx \sqrt{I_{х.х.а}^2 + I_\mu^2} =$$

$$= \sqrt{0,83^2 + 7,75^2} = 7,8 \text{ А};$$

по (6-213)

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1х.х}}{mU_{1н}} =$$

$$= \frac{358,1 + 117 + 72,4}{3\cdot 220} = 0,83 \text{ А},$$

где по (6-214)

$$P_{э1х.х} \approx 3I_\mu^2 r_1 = 3\cdot 7,75^2\cdot 0.402 = 72,4 \text{ Вт};$$

по (6-215)

$$\cos\varphi_{х.х} = \frac{I_{х.х.а}}{I_{х.х}} = \frac{0,83}{7,8} = 0,11.$$

Расчет рабочих характеристик

56. По (6-179)

$$r_{12} \approx \frac{P_{ст.осн}}{mI_\mu^2} = \frac{270,8}{3\cdot 7,75^2} = 1,5 \text{ Ом};$$

по (6-180)

$$x_{12} \cong \frac{U_{1н}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{7,75} - 0,725 = 27,66 \text{ Ом};$$

по (6-218)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,725}{27,66} = 1,026$$

[используем приближенную формулу, так как $|\gamma| < 1°$;
по (6-217)

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} =$$

$$= \frac{0,402\cdot 27,66 - 1,5\cdot 0,725}{1,5(0,402+1,5)+27,66(0,725+27,66)} =$$

$$= |43|' < 1°];$$

по (6-222)

$$I_{0а} = \frac{P_{ст.осн} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_{1н}} =$$

$$= \frac{270,8 + 3\cdot 7,75^2\cdot 0,402}{3\cdot 220} = 0,52 \text{ А};$$

по (6-223)

$$a' = c_1^2 = 1,026^2 = 1,053; \quad b' = 0;$$

$$a = c_1 r_1 = 1,026\cdot 0,402 = 0,412;$$

$$b = c_1\left(x_1 + c_1 x_2'\right) =$$

$$= 1,026\,(0,725 + 1,026\cdot 1,02) = 1,818.$$

Потери, не меняющиеся при изменении скольжения;

$$P_{ст} + P_{мех} = 358,1 + 117 = 475,1 \text{ Вт} \approx 0,48 \text{ кВт}.$$

Принимаем $s_н \approx r_{2*}' \approx 0,026$ и рассчитываем рабочие характеристики, задаваясь $s=0,05$; 0,01; 0,015; 0,020; 0,026; 0,03.

После построения кривых уточняем значение номинального скольжения $s_н = 0,0261$.

Результаты расчета приведены в табл. 6-31. Характеристики представлены на рис. 6-44.

Номинальные данные спроектированного двигателя: $P_{2н}=15$ кВт; $U_{1н}=220/380$ В; $I_{1н}=29$ А; $\cos\varphi_н=0,89$; $\eta_н=0,88$; $s_н=0,026$.

57. Расчет пусковых характеристик. Рассчитываем точки характеристик, соответствующие скольжениям $s=1$; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1.

Подробный расчет приведен для скольжения $s=1$. Данные расчета других точек сведены в табл. 6-32. Пусковые характеристики спроектированного двигателя представлены на рис. 6-67.

Таблица 6-31

Данные расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$P_{2н}=15$ кВт; $U_{1н}=220/380$ В; $2p=4$; $I_{2н}=29$ А; $P_{ст}+P_{мех}=0,48$ кВт; $P_{доб.н}=0,08$ кВт; $I_{0а}=0,52$ А; $I_{0р}\approx I_{\mu}=7,75$ А; $r_1=0,402$ Ом; $r_2'=0,196$ Ом; $c_1=1,026$; $a'=1,053$ Ом; $a=0,412$ Ом; $b'=0$; $b=1,818$ Ом

№ п/п	Расчетная формула	Единица	Скольжение						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$s_н=$ =0,026
1	$a'r_2'/s$	Ом	41,28	20,64	13,76	10,32	8,26	6,88	7,94
2	$b'r_2'/s$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
3	$R=a+a'r_2'/s$	Ом	41,69	21,05	14,17	10,73	8,67	7,29	8,35
4	$X=b+b'r_2'/s$	Ом	1,818	1,818	1,818	1,818	1,818	1,818	1,818
5	$Z=\sqrt{R^2+X^2}$	Ом	41,73	21,13	14,29	10,88	8,86	7,51	8,55
6	$I_2''=U_{1н}/Z$	А	5,27	10,41	15,40	20,22	24,83	29,29	25,73
7	$\cos\varphi_2'=R/Z$	—	0,999	0,996	0,992	0,986	0,979	0,971	0,977
8	$\sin\varphi_2'=X/Z$	—	0,044	0,086	0,127	0,167	0,205	0,242	0,213
9	$I_{1а}=I_{0а}+I_2''\cos\varphi_2'$	А	5,78	10,89	15,80	20,46	24,83	28,96	25,66
10	$I_{1р}=I_{0р}+I_2''\sin\varphi_2'$	А	7,98	8,64	9,71	11,13	12,84	14,84	13,23
11	$I_1=\sqrt{I_{1а}^2+I_{1р}^2}$	А	9,86	13,90	18,55	23,29	27,95	32,54	28,81
12	$I_2'=c_1 I_2''$	А	5,41	10,68	15,80	20,75	25,48	30,05	26,40
13	$P_1=3U_{1н}I_{1а}\cdot10^{-3}$	кВт	3,81	7,19	10,43	13,50	16,39	19,11	16,93
14	$P_{э1}=3I_1^2 r_1\cdot10^{-3}$	кВт	0,12	0,23	0,41	0,65	0,94	1,28	1,0
15	$P_{э2}=3I_2'^2 r_2'\cdot10^{-3}$	кВт	0,02	0,07	0,15	0,25	0,38	0,53	0,41
16	$P_{доб}=P_{доб.н}(I_1/I_{1н})^2$	кВт	0,01	0,02	0,03	0,05	0,07	0,10	0,08
17	$\Sigma P=P_{ст}+P_{мех}+P_{э1}+P_{э2}+P_{доб}$	кВт	0,63	0,80	1,07	1,43	1,87	2,39	1,97
18	$P_2=P_1-\Sigma P$	кВт	3,18	6,39	9,36	12,07	14,52	16,72	14,96
19	$\eta=1-\Sigma P/P_1$	—	0,835	0,889	0,897	0,894	0,886	0,875	0,884
20	$\cos\varphi=I_{1а}/I_1$	—	0,586	0,783	0,852	0,878	0,888	0,890	0,889

Параметры с учетом вытеснения тока ($\vartheta_{расч}=115°$С): по (6-235)

$$\xi=63,61h_c\sqrt{s}=63,61\cdot0,031=1,97;$$

для $\xi=1,97$ находим по рис. 6-46 $\varphi=0,86$; по рис. 6-47 $\varphi'=k_д=0,75$.

Активное сопротивление обмотки ротора:

по (6-236)

$$h_r=\frac{h_c}{1+\varphi}=\frac{0,031}{1+0,86}=0,0167\text{ м}=16,7\text{ мм};$$

по (6-243)

$$q_r=\frac{\pi b_2^2}{8}+\frac{b_2+b_r}{2}\left(h_r-\frac{b_2}{2}\right)=\frac{\pi\cdot7,8^2}{8}+\frac{7,8+5,7}{2}\left(16,7-\frac{7,8}{2}\right)=110,3\text{ мм}^2,$$

где

$$b_r=b_2-\frac{b_2-b_1}{h_1}\left(h_r-\frac{b_2}{2}\right)=7,8-\frac{7,8-3,6}{25,3}\left(16,7-\frac{7,8}{2}\right)=5,7\text{ мм};$$

Таблица 6-32

Данные расчета пусковых характеристик двигателя

$P_2=15$ кВт; $2p=4$; $U_н=220/380$ В; $x_{12п}=42{,}72$ Ом; $x_1=0{,}725$ Ом; $x_2'=1{,}02$ Ом; $r_1=0{,}402$ Ом; $r_2'=0{,}196$ Ом; $I_{1н}=28{,}97$ А; $I_{2н}'=26{,}51$ А; $s_н=0{,}0261$

№ п/п.	Расчетная формула	Единица	Скольжение					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,15
1	ξ	—	1,97	1,76	1,39	0,88	0,62	0,76
2	φ	—	0,86	0,6	0,25	0,05	0,01	0,03
3	$k_r = q_c/q_r$	—	1,57	1,39	1,15	1	1	1
4	$k_R = 1 + \frac{r_2}{r_c}(k_r - 1)$	—	1,39	1,26	1,1	1	1	1
5	$r_{2\xi}' = K_R r_2'$	Ом	0,272	0,246	0,216	0,196	0,196	0,196
6	$k_д$	—	0,75	0,82	0,91	0,97	1	1
7	$K_x = \frac{\Sigma\lambda_{2\xi}}{\Sigma\lambda_2}$	—	0,813	0,833	0,861	0,881	0,901	0,894
8	$x_{2\xi}' = K_x x_2'$	Ом	0,829	0,850	0,878	0,899	0,919	0,912
9	$x_{2\xi нас}' = x_2' \frac{\Sigma\lambda_{2\xi нас}}{\Sigma\lambda_2}$	Ом	0,563	0,588	0,623	0,679	0,784	0,721
10	$x_{1нас} = \frac{\Sigma\lambda_{1нас}}{\Sigma\lambda_1}$	Ом	0,559	0,561	0,567	0,591	0,653	0,614
11	$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	—	1,013	1,013	1,013	1,014	1,015	1,014
12	$a_п = r_1 + c_{1п.нас}\frac{r_{2\xi}'}{s}$	Ом	0,678	0,713	0,840	1,40	2,39	1,73
13	$b_п = x_{1нас} + c_{1п.нас}\frac{r_{2\xi}'}{s'}$	Ом	1,129	1,157	1,198	1,280	1,449	1,345
14	$I_2' = \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_п^2 + b_п^2}}$	А	167,1	161,9	150,4	116,0	78,7	100,4
15	$I_1 = I_2' \times \frac{\sqrt{a_п^2 + (b_п + x_{12п})^2}}{c_{1п} x_{12п}}$	А	169,3	164,2	152,7	117,9	80,3	102,2
16	$I_{1*} = I_1/I_{1н}$	—	5,84	5,67	5,27	4,07	2,77	3,53
17	$M_* = \left(\frac{I_2'}{I_{2н}'}\right)^2 K_R \frac{s_н}{s'}$	—	1,44	1,53	1,85	2,49	2,30	2,50

по (6-237)

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{173,2}{110,3} = 1,57;$$

по (6-247)

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2}(k_r - 1) =$$

$$= 1 + \frac{36,61 \cdot 10^{-6}}{53,92 \cdot 10^{-6}}(1,57 - 1) = 1,39.$$

Приведенное активное сопротивление ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока (см. п. 45)

$$r_{2\xi}' = K_R r_2' = 1,39 \cdot 0,196 = 0,272 \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора: по табл. 6-23 и рис. 6-40, *а*, и (см. также п. 47 примера расчета)

$$\lambda_{п2\xi} = \left[\frac{h_1}{3b}\left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_ш}{2b}\right]k_д +$$

$$+ \frac{h_ш}{b_ш} + 1{,}12\frac{h'_ш \cdot 10^6}{I_2} =$$

$$= \left[\frac{30{,}64}{3\cdot 7{,}8}\left(1 - \frac{\pi\cdot 7{,}8^2}{8\cdot 173{,}2}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + 0{,}66 - \frac{1{,}5}{2\cdot 7{,}8}\right]0{,}75 + \frac{0{,}7}{1{,}5} +$$

$$+ 1{,}12\frac{0{,}3\cdot 10^{-8}\cdot 10^6}{6{,}5\cdot 442} = 1{,}74$$

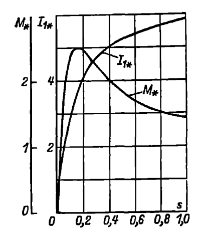


Рис. 6-67. Пусковые характеристики спроектированного двигателя, $P_2 = 15$ кВт, $2p = 4$, $U_н = 220/380$ В.

[при $s = 1$ предварительно принимаем $I_{2п}/I_{2н} \approx 6{,}5$];
по (6-251)

$$K_x = \frac{\lambda_{п2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{\Sigma\lambda_{2\xi}}{\Sigma\lambda_2} =$$

$$= \frac{1{,}74 + 0{,}61 + 2{,}08}{2{,}76 + 0{,}61 + 2{,}08} = \frac{4{,}43}{5{,}45} = 0{,}813;$$

по (6-250)

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 1{,}02\cdot 0{,}813 = 0{,}829 \text{ Ом}.$$

Ток ротора приближенно без учета влияния насыщения по (6-269), принимая $c_{1п} = 1$,

$$I'_2 \approx \frac{U_{1н}}{\sqrt{(r_1 + r'_{2\xi}/s)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{(0{,}402 + 0{,}272)^2 + (0{,}725 + 0{,}829)^2}} =$$

$$= 129{,}9 \text{ А}.$$

58. Учет влияния насыщения на параметры. Принимаем для $s = 1$ коэффициент насыщения $k_{нас} = 1{,}35$ и $I_1 \approx I'_2$ и приводим расчет для $k_{нас} I_1 = 1{,}35\cdot 129{,}9 = 175{,}5$ А.

По (6-252)

$$F_{п.ср} = 0{,}7\frac{k_{нас} I_1 u_{п1}}{a}\left(k'_\beta - k_{у1} k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right) =$$

$$= 0{,}7\frac{175{,}5\cdot 28}{2}\left(1 + 0{,}958\frac{48}{38}\right) = 3801 \text{ А};$$

по (6-253)

$$B_{ф\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1{,}6\delta C_N}10^{-6} =$$

$$= \frac{3801\cdot 10^{-6}}{1{,}6\cdot 0{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}978} = 4{,}86 \text{ Тл},$$

где по (6-254)

$$C_N = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0{,}64 +$$

$$+ 2{,}5\sqrt{\frac{0{,}5}{12{,}1 + 15{,}2}} = 0{,}978.$$

По рис. 6-50 для $B_{ф\delta} = 4{,}86$ Тл находим $\varkappa_\delta = 0{,}5$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:
по (6-255)

$$c_1 = (t_1 - b_{ш1})(1 - \varkappa_\delta) =$$

$$= (12{,}1 - 3{,}7)(1 - 0{,}5) = 4{,}2 \text{ мм};$$

по (6-258)

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0{,}58h'}{b_{ш1}}\,\frac{c_1}{c_1 + 1{,}5b_{ш1}} =$$

$$= \frac{1 + 0{,}58\cdot 2}{3{,}7}\,\frac{4{,}2}{4{,}2 + 1{,}5\cdot 3{,}7} = 0{,}25;$$

по (6-261)

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1{,}48 -$$

$$- 0{,}25 = 1{,}23.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения по (6-263)

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1}\varkappa_\delta = 1{,}57\cdot 0{,}5 = 0{,}79.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения по (6-264)

$$x_{1нас} = x_1\frac{\Sigma\lambda_{1нас}}{\Sigma\lambda_1} = 0{,}725\frac{3{,}46}{4{,}5} = 0{,}559,$$

где

$$\Sigma\lambda_{1нас} = \lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1} =$$

$$= 1{,}23 + 0{,}79 + 1{,}45 = 3{,}47.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:
по (6-260)

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}\,\frac{c_2}{b_{ш2} + c_2} =$$

$$= \frac{0{,}7}{1{,}5}\,\frac{6{,}85}{1{,}5 + 6{,}85} = 0{,}38,$$

где по (6-259)

$$c_2 = (t_2 - b_{\text{ш2}})(1 - \varkappa_\delta) =$$
$$= (15,2 - 1,5)(1 - 0,5) = 6,85 \text{ мм};$$

по (6-262)

$$\lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} =$$
$$= 1,74 - 0,38 = 1,36.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения по (6-263)

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \varkappa_\delta = 2,08 \cdot 0,5 = 1,04.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния вытеснения тока и насыщения по (6-265)

$$x'_{2\xi\text{нас}} = x'_2 \frac{\Sigma\lambda_{2\xi\text{нас}}}{\Sigma\lambda_2} =$$
$$= 1,02 \frac{3,01}{5,45} = 0,563 \text{ Ом},$$

где

$$\Sigma\lambda_{2\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{п2}\xi\text{нас}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}} =$$
$$= 1,36 + 1,04 + 0,61 = 3,01.$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме:

по (6-266)

$$x_{12\text{п}} = x_{12} \frac{F_\text{ц}}{F_\delta} = 27,66 \frac{1123,2}{727,2} = 42,72;$$

по (6-267)

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}} = 1 +$$
$$+ \frac{0,559}{42,72} = 1,013.$$

Расчет токов и моментов:

по (6-268)

$$a_\text{п} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0,402 +$$
$$+ 1,013 \cdot 0,272 = 0,678;$$
$$b_\text{п} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{п нас}} x'_{2\xi\text{нас}} =$$
$$= 0,559 + 1,013 \cdot 0,563 = 1,129;$$

по (6-269)

$$I'_2 = \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{a_\text{п}^2 + b_\text{п}^2}} =$$
$$= \frac{220}{0,678^2 + 1,129^2} = 167,1 \text{ А};$$

по (6-271)

$$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{a_\text{п}^2 + (b_\text{п} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{п нас}} x_{12\text{п}}} =$$
$$= 167,1 \frac{\sqrt{0,678^2 + (1,129 + 42,72)^2}}{1,013 \cdot 42,72} =$$
$$= 169,3 \text{ А}.$$

Полученное значение тока I_1 составляет 96,5% принятого при расчете влияния насыщения на параметры, что допустимо.

Относительные значения

$$I_{\text{п}*} = \frac{I_{1\text{п}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{169,3}{28,97} = 5,84;$$
$$M_{\text{п}*} = \left(\frac{I'_{2\text{п}}}{I'_{2\text{н}}}\right)^2 K_R \frac{s_\text{н}}{s_\text{п}} =$$
$$= \left(\frac{167,1}{26,58}\right)^2 \cdot 1,39 \cdot 0,0261 = 1,44.$$

Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик (см. табл. 6-32) по средним значениям сопротивлений $x_{1\text{нас}}$ и $x_{2\xi\text{нас}}$, соответствующим скольжениям $s = 0,2 \div 0,1$ по (6-272):

$$s_\text{кр} = \frac{r'_2}{\dfrac{x_{1\text{нас}}}{c_{1\text{п нас}}} + x'_{2\xi\text{нас}}} =$$
$$= \frac{0,196}{\dfrac{0,62}{1,014} + 0,73} \approx 0,15,$$

после чего рассчитываем точку характеристики, соответствующую $s_\text{кр} = 0,15$: $M_{max*} = 2,5$.

Кратности пускового и максимального моментов и пускового тока спроектированного двигателя удовлетворяют требованиям ГОСТ.

Тепловой расчет

59. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя по (6-314):

$$\Delta\vartheta_{\text{пов1}} = K \frac{P'_{\text{э,п1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi D l_1 \alpha_1} =$$
$$= 0,2 \frac{389,9 + 270,8}{\pi \cdot 0,185 \cdot 0,13 \cdot 108} = 16,19 °\text{C}$$

[по табл. 6-30 $K = 0,2$; по (6-312) $P'_{\text{э,п1}} = k_\rho P_{\text{э1}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 1012 \cdot \frac{2 \cdot 0,13}{0,722} = 389,9$ Вт; по рис. 6-59, *б* $\alpha_1 = 108$ Вт/(м²·°С)].

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по (6-315)

$$\Delta\vartheta_{\text{из.п1}} = \frac{P'_{\text{э,п1}}}{Z_1 \Pi_{\text{п1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из,п1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{экв}}}\right) =$$
$$= \frac{389,9}{48 \cdot 0,06 \cdot 0,13} \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \right.$$
$$\left. + \frac{0,01 + 0,0076}{16 \cdot 1,1}\right) = 3,64 °\text{C}$$

[по (6-316) $\Pi_{\text{п1}} = 2h_\text{п} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 21,2 + 10 + 7,5 \approx 60$ мм $= 0,06$ м;

для изоляции класса нагревостойкости F $\lambda_{экв}=0,16$ Вт/(м·°С); по рис. 6-62 для $d/d_{из}=1,25/1,33=0,94$ находим $\lambda_{экв}=1,1$ Вт/(м·°С)].

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (6-319):

$$\Delta\vartheta_{из,лi}=\frac{P'_{э,лi}}{2Z_i П_{лi} l_{лi}}\left(\frac{b_{из,лi}}{\lambda_{экв}}+\frac{h_{пi}}{12\lambda'_{экв}}\right)=$$

$$=\frac{692,9\cdot 21,2\cdot 10^{-3}}{2\cdot 48\cdot 0,06\cdot 0,231\cdot 12\cdot 11}=0,08°С$$

$$\left[\text{по (6-313) } P'_{э,лi}=k_\rho P_{э1}\frac{2l_{лi}}{l_{срi}}=\right.$$

$$=1,07\cdot 1012\frac{2\cdot 0,231}{0,722}=692,9 \text{ Вт};$$

$$\left.П_{лi}=П_{пi}=0,06\,\text{м};\quad b_{из,лi}=0\right].$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины по (6-320):

$$\Delta\vartheta_{пов,лi}=\frac{KP'_{э,лi}}{2\pi D l_{вылi}\alpha_i}=$$

$$=\frac{0,2\cdot 692,9}{2\pi\cdot 0,185\cdot 74,8\cdot 10^{-3}\cdot 105}=15,18°С.$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины по (6-321)

$$\Delta\vartheta'_1=\frac{(\Delta\vartheta_{пов1}+\Delta\vartheta_{из,пi})2l_i}{l_{срi}}+$$

$$+\frac{(\Delta\vartheta_{из,лi}+\Delta\vartheta_{пов,лi})\,2l_{лi}}{l_{срi}}=$$

$$=\frac{(16,19+3,64)\cdot 2\cdot 0,13}{0,722}+$$

$$+\frac{(0,08+15,18)\cdot 2\cdot 0,231}{0,722}=16,91°С.$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды по (6-322):

$$\Delta\vartheta_в=\frac{\Sigma P'_в}{S_{кор}\alpha_в}=\frac{1457}{0,98\cdot 20}=74,3°С$$

$$\left[\text{по (6-326) } \Sigma P'_в=\Sigma P'-(1-K)\left(P'_{э,пi}+\right.\right.$$

$$\left.+P_{ст.осн}\right)-0,9P_{мех}=2091-$$

$-(1-0,2)(389,9+270,8)-0,9\cdot 117=1457$ Вт, где $\Sigma P'=\Sigma P+(k_\rho-1)(P_{э1}+P_{э2})=1991+$ $+(1,07-1)(1012+413,2)=2091$ Вт; по (6-327) $S_{кор}=(\pi D_a+8П_р)(l_1+2l_{выл1})=$ $=(\pi\cdot 0,272+8\cdot 0,33)(0,13+2\cdot 0,0748)=$ $=0,98\,\text{м}^2$, где по рис. 6-63 $П_р=0,33\,\text{м}^2$ для $h=160$ мм; по рис. 6-59, *б* $\alpha_в=20$ Вт/(м²×°С) для $D_a=0,272$ м].

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по (6-328):

$$\Delta\vartheta_1=\Delta\vartheta'_1+\Delta\vartheta_в=74,3+16,9=91,2°С.$$

60. Расчет вентиляции. Требуемый для охлаждения расход воздуха по (6-340)

$$Q_в=\frac{k_m\Sigma P'_в}{1100\Delta\vartheta_в}=\frac{5,05\cdot 1457}{1100\cdot 74,3}=0,09\,\text{м}^3/\text{с}$$

$$\left[\text{по (6-341) } k_m=m\sqrt{\frac{n}{100}D_a}=\right.$$

$$\left.=2,5\sqrt{\frac{1500}{100}0,272}=5,05\right].$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (6-342)

$$Q'_в=0,6D_a^3\frac{n}{100}=0,6\cdot 0,272^3\,\frac{1500}{100}=$$

$$=0,18\,\text{м}^3/\text{с};$$

$$Q'_в>Q_в.$$

б) Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором

Техническое задание

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором. $P_2=132$ кВт, $2p=6$, $U=380/660$ В; конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты IP23; категория размещения У3.

За базовую принимаем конструкцию двигателей 4АН.

Выбор главных размеров

1. По рис. 6-7, *б* принимаем $h=315$ мм; по табл. 6-6 $D_a=590$ мм$=0,59$ м.

2. По (6-2)

$$D=K_D D_a=0,72\cdot 0,59=$$

$$=0,425\,\text{м}\;[\text{по табл. 6-7 для } 2p=6$$

$$K_D=0,72].$$

3. По (6-3)

$$\tau=\frac{\pi D}{2p}=\frac{\pi\cdot 0,425}{6}=0,2225\,\text{м}.$$

4. По (6-4)

$$P'=P_2\frac{k_E}{\eta\cos\varphi}=132\frac{0,98}{0,92\cdot 0,88}=$$

$$=159,8\,\text{кВт}$$

[$k_E=0,98$ — по рис. 6-8; $\eta=0,92$; $\cos\varphi=0,88$ — по рис. 6-10].

5. По (6-6)

$$l_\delta=\frac{P'}{D^2\Omega k_B k_{об1}AB_\delta}=$$

$$=\frac{159\,800}{0,425^2\cdot 104,7\cdot 1,11\cdot 0,92\cdot 51\cdot 10^3\cdot 0,84}=$$

$$=0,193\approx 0,19\,\text{м}$$

[по (6-5)

$$\Omega = 2\pi \frac{f}{p} = 2\pi \frac{50}{3} = 104{,}7 \text{ рад/с};$$

$A = 51 \cdot 10^3$ А/м; по рис. 6-12,*б* $B_\delta = 0{,}84$ Тл; $k_{об1} \approx 0{,}92$].

6. $$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0{,}19}{0{,}2225} = 0{,}85.$$

Окончательно принимаем:

$$D_a = 0{,}59 \text{ м}; \quad D = 0{,}425 \text{ м};$$

$$l_1 = l_\delta = 0{,}19 \text{ м}.$$

Расчет зубцовой зоны и обмотки статора

7. По (6-16)

$$Z_{1min} \div Z_{max} = \frac{\pi D}{t_{1max}} \div \frac{\pi D}{t_{1min}} = \frac{\pi \cdot 425}{22} \div \frac{\pi \cdot 425}{17} = 60{,}7 \div 78{,}5$$

[по табл. 6-9 $t_1 = 17 \div 22$ мм].

8. Принимаем:

$$Z_1 = 72, \quad q_1 = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{72}{6 \cdot 3} = 4;$$

$$t_1 = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}425}{72} = 18{,}54 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 18{,}54 \text{ мм}.$$

9. По (6-17)

$$u_п' = \frac{\pi D A}{I_{1н} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}425 \cdot 51 \cdot 10^3}{143 \cdot 72} = 6{,}61$$

[по (6-18)

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m U_{1н} \eta \cos\varphi} = \frac{132\,000}{3 \cdot 380 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}88} = 143 \text{ А}\Big];$$

по (6-19)

$$u_п = a u_п' = 3 \cdot 6{,}61 = 19{,}83.$$

Принимаем: $a=3$; $u_п=20$.

10. По (6-20)

$$w_1 = \frac{u_п Z_1}{2am} = \frac{20 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 80.$$

11. По (6-21)

$$A = \frac{2 I_{1н} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 143 \cdot 80 \cdot 3}{\pi \cdot 0{,}425} = 51{,}41 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

12. $k_{об1} = k_{р1} k_{у1} = 0{,}958 \cdot 0{,}966 = 0{,}925$

[по табл. 3-13 для $q = 4$ $k_{р1} = 0{,}958$; по (3-4) $k_{у1} = \sin\frac{\pi}{2}\beta = \sin\frac{\pi}{2} 0{,}833 = 0{,}966$, где $\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{10}{12} = 0{,}833$; $y = 10$, $\tau = \frac{Z_1}{2p} = \frac{72}{6} = 12$].

13. По (6-22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1н}}{4 k_в w_1 k_{об1} f_1} = \frac{0{,}98 \cdot 380}{4 \cdot 1{,}11 \cdot 80 \cdot 0{,}925 \cdot 50} = 22{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

14. По (6-23)

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{3 \cdot 22{,}67 \cdot 10^{-3}}{0{,}425 \cdot 0{,}19} = 0{,}842 \text{ Тл}.$$

15. По (6-24)

$$q_{эф1} = \frac{I_{1н}}{a J_1} = \frac{143}{3 \cdot 5{,}06 \cdot 10^6} = 9{,}42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 9{,}42 \text{ мм}^2$$

$$\Big[J_1 = \frac{(AJ_1)}{A} = \frac{260 \cdot 10^9}{51{,}41 \cdot 10^3} = 5{,}06 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2,$$

где по рис. 6-16,*д* $(AJ_1) = 260 \cdot 10^9$ А²/м³].

Обмотка из подразделенных катушек, провод прямоугольный, $n_{эл}=2$. Предварительно

$$q_{эл} = \frac{q_{эф1}}{n_{эл}} = \frac{9{,}42}{2} = 4{,}71 \text{ мм}^2.$$

16. По (6-29)

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{B_{z1max} l_{ст1} k_c} = \frac{0{,}842 \cdot 18{,}54 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}19}{1{,}9 \cdot 0{,}19 \cdot 0{,}95} = 8{,}65 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8{,}65 \text{ мм}$$

[по табл. 6-10 $B_{zmin}=1{,}9$ Тл; по табл. 6-11 для стали 2312 $k_c=0{,}95$].

17. Предварительно

$$b_п = t_1 - b_{z1min} = 18{,}54 - 8{,}65 = 9{,}89 \text{ мм};$$

по (6-35)

$$b_{эл}' = 0{,}5\left(b_п - \Delta_{из}'\right) = 0{,}5\left(b_п - 2b_{из} - \Delta b_п\right) = 0{,}5\,(9{,}89 - 2 \cdot 1{,}1 - 0{,}3) = 3{,}7 \text{ мм}$$

[по табл. 3-7 $b_{из}=1{,}1$ мм; по § 6-5 $\Delta b_п=0{,}3$ мм].

18. По табл. П-29 выбираем провод ПЭТП-155 $\dfrac{1{,}4 \cdot 3{,}55}{1{,}52 \cdot 3{,}67}$:

$$q_{эл} = 4{,}755 \text{ мм}^2; \quad q_{эф1} = q_{эл} n_{эл} = 4{,}755 \cdot 2 = 9{,}51 \text{ мм}^2.$$

19. С учетом табл. 3-7 составляем таблицу заполнения паза (табл. 6-33). Размеры паза в штампе (рис. 6-68,*а*) принимаем с учетом припусков $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$.

Таблица 6-33

Заполнение паза статора

Наименование	Размеры паза, мм	
	по ширине	по высоте
Обмоточный провод изолированный 1,52×3,67	3,67×2==7,34	1,52×20==30,4
Пазовая изоляция и допуск на укладку (по табл. 3-7)	2,2	4,5
Всего на паз без клина	9,54	34,9

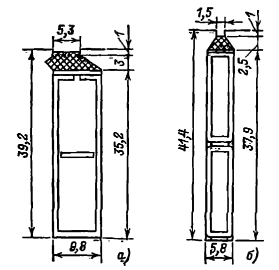


Рис. 6-68. Пазы спроектированного двигателя, $P_2=132$ кВт; $2p=6$; $U_н=380/660$ В.

20. По (6-27) уточняем

$$J_1=\frac{I_{1н}}{aq_{эф1}}=\frac{143}{3\cdot 9{,}51\cdot 10^{-6}}=5{,}01\cdot 10^6\ А/м^2.$$

21. По рис. 6-21 $\delta=0{,}9$ мм.

22. $D_2=D-2\delta=0{,}425-2\cdot 0{,}0009=0{,}4232$ м.

23. Принимаем $l_2=l_1+0{,}005=0{,}19+0{,}005=0{,}195$ м.

24. Обмотку ротора выполняем стержневой волновой с $q=4^1/_2$, тогда $Z_2=2p_2m_2q_2=6\cdot 3\cdot 4{,}5=81$.

25. $$t_2=\frac{\pi D_2}{Z_2}=\frac{\pi\cdot 0{,}4232}{81}=$$

$$=16{,}41\cdot 10^{-3}\ м=16{,}41\ мм.$$

26. По (6-58)

$$w_2=2p_2q_2=6\cdot 4{,}5=27.$$

27. По (6-59)

$$U_к=\sqrt{3}\,U_{1н}\frac{w_2}{w_1}=\sqrt{3}\cdot 380\,\frac{27}{81}=$$

$$=219{,}4\ В.$$

28. По (6-60)

$$I_2=k_i I_1\nu_i=0{,}91\cdot 143\cdot 2{,}87=373{,}4\ А$$

[по рис. 6-22 $k_i=0{,}91$; по (6-61) $\nu_i=$

$$=\frac{m_1w_1k_{об1}}{m_2w_2k_{об2}}=\frac{3\cdot 80\cdot 0{,}925}{3\cdot 27\cdot 0{,}955}=2{,}87,$$

где по (3-12)

$$k_{об2}=k_{р2}=\frac{0{,}5}{N\sin\frac{\pi}{2mN}}=\frac{0{,}5}{9\sin\frac{\pi}{2\cdot 3\cdot 9}}=$$

$$=0{,}955$$

при $q=4\frac{1}{2}$; $N=2\cdot 4+1=9$ (см. гл. 3)].

29. По (6-62)

$$q_{эф2}=\frac{I_2}{J_2}=\frac{373{,}4}{5{,}7\cdot 10^6}=65{,}5\cdot 10^{-6}\ м^2=$$

$$=65{,}5\ мм^2$$

[принимаем $J_2=5{,}7\cdot 10^6$ А/м²].

30. Предварительно $b_{п2}=0{,}35\ t_2=0{,}35\times 16{,}41=5{,}74$ мм;

$$b_{эл2}=b_{п2}-2b_{из2}-\Delta b_п=$$

$$=5{,}74-1{,}7-0{,}3=3{,}74\ мм$$

[$b_{из2}=1{,}7$ мм — по табл. 3-11, $\Delta b_п=0{,}3$ мм].

По табл. П-29 выбираем провод $a=3{,}8$ мм; $b=16{,}8$ мм; $q_{эф2}=63{,}36$ мм².

31. Уточняем $$J_2=\frac{I_2}{q_{эф2}}=\frac{373{,}4}{63{,}36\cdot 10^{-6}}=$$

$$=5{,}89\cdot 10^6\ А/м^2.$$

32. С учетом данных табл. 3-11 составляем таблицу заполнения паза ротора (табл. 6-34). Размеры паза в штампе (рис. 6-68, б) принимаем с учетом припусков $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$.

Таблица 6-34

Заполнение паза ротора

Наименование	Размеры на паз, мм	
	по ширине	по высоте
Стержни обмотки — неизолированная медь 3,8×16,8	3,8	16,8×2==33,6
Пазовая изоляция и допуск на укладку (по табл. 3-11)	1,7	4,0
Всего на паз без клина	5,5	37,6

33. Проверяем индукцию в наиболее узком месте зубца ротора (см. табл. 6-10): по (6-64)

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2min} l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{0,842 \cdot 16,41 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{7,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,195 \cdot 0,95} = 1,91 \text{ Тл},$$

где по (6-63)

$$b_{z2min} = \frac{\pi (D_2 - 2h_{п2})}{Z_2} - b_{п2} =$$

$$= \frac{\pi (423,2 - 2 \cdot 41,4)}{81} - 5,8 = 7,4 \text{ мм} =$$

$$= 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

[k_c=0,95 — по табл. 6-11].

Значение B_{z2max} находится в пределах, указанных в табл. 6-10.

34. По (6-101)

$$D_в = k_в D_a = 0,23 \cdot 0,59 = 0,136 \text{ м}$$

[по табл. 6-16 для h=315 мм и $2p$=6 $k_в$= =0,23].

Принимаем $D_в$=D_j=0,14 м. В роторе 12 аксиальных каналов; $d_{к2}$=30 мм, $m_{к2}$= =1.

Расчет магнитной цепи

35. По (6-104)

$$B_{z1max} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{b_{z1min} l_{ст1} k_c} =$$

$$= \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{8,74 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,88 \text{ Тл};$$

$$B_{z1min} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{b_{z1max} l_{ст1} k_c} =$$

$$= \frac{0,842 \cdot 18,54 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{12,16 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} = 1,35 \text{ Тл};$$

$$B_{z1ср} = \frac{B_{z1max} + B_{z1min}}{2} = \frac{1,88 + 1,35}{2} =$$

$$= 1,62 \text{ Тл}$$

[по (6-36) b_{z1min}=t_1—$b_{п1}$=18,54·10^{-3}— —9,8·10^{-3}=8,74·10^{-3} м;
по (6-37)

$$b_{z1max} = t_1 \left(1 + \frac{2h_{п1}}{D}\right) - b_{п} =$$

$$= 18,54 \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{2 \cdot 39,2 \cdot 10^{-3}}{0,425}\right) -$$

$$- 9,8 \cdot 10^{-3} = 12,16 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

36. По (6-104)

$$B_{z2min} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2max} l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{0,842 \cdot 16,41 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19}{10,34 \cdot 10^{-3} \cdot 0,195 \cdot 0,95} = 1,37 \text{ Тл};$$

$$B_{z2ср} = \frac{B_{z2max} + B_{z2min}}{2} =$$

$$= \frac{1,91 + 1,37}{2} = 1,63 \text{ Тл}$$

[по (6-66)

$$b_{z2max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{ш} + h_к)}{Z_2} - b_{п2} =$$

$$= \pi \frac{423,2 - 2(1 + 2,5)}{81} - 5,8 = 10,34 \text{ мм} =$$

$$= 10,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

37. По (6-105)

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{ст1} k_c} = \frac{22,67 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 43,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95} =$$

$$= 1,45 \text{ Тл}$$

[по (6-106)

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} - \frac{2}{3} d_{к1} m_{к1} =$$

$$= \frac{0,59 - 0,425}{2} - 39,2 \cdot 10^{-3} = 43,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

38. По (6-107)

$$B_j = \frac{\Phi}{2h'_j l_{ст2} k_c} =$$

$$= \frac{22,67 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 80,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,195 \cdot 0,95} = 0,76 \text{ Тл}$$

[по (6-108)

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} - \frac{2}{3} d_{к2} m_{к2} =$$

$$= \frac{0,4232 - 0,14}{2} - 41,4 \cdot 10^{-3} -$$

$$- \frac{2}{3} 0,03 = 80,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

39. По (6-110)

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 B_\delta \delta k_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,842 \cdot 0,9 \times$$
$$\times 10^{-3} \cdot 1,21 = 1459 \text{ А}$$

[по (4-17) $k_\delta = k_{\delta1} k_{\delta2}$ = 1,183·1,023 = 1,21,

где по (4-14)

$$k_{\delta1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{18,54}{18,54 - 3,18 \cdot 0,9} =$$

$$= 1,183;$$

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta} = \frac{(5,3/0,9)^2}{5 + 5,3/0,9} = 3,18;$$

$$k_{\delta2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta} = \frac{16,41}{16,41 - 0,417 \cdot 0,9} =$$

$$= 1,023;$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta} = \frac{(1,5/0,9)^2}{5 + 1,5/0,9} = 0,417].$$

40. По (6-111)

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1} = 2 \cdot 39,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1772 = 138,9 \text{ А}$$

[по (6-112)

$$H_{z1}=\frac{1}{6}(H_{z1max}+H_{z1min}+4H_{z1ср})=$$

$$=\frac{1}{6}(3710+804+4\cdot1530)=1772 \text{ А/м};$$

для $B_{z1max}=1{,}88$ Тл; $B_{z1ср}=1{,}62$ Тл и $B_{z1min}=1{,}35$ Тл по табл. П-17 $H_{z1max}=3710$ А/м; $H_{z1ср}=1530$ А/м; $H_{z1min}=804$ А/м].

41. По (6-113)

$$F_{z2}=2h_{z2}H_{z2}=2\cdot41{,}4\cdot10^{-3}\cdot1938=160{,}4 \text{ А}$$

$$\left[H_{z2}=\frac{1}{6}(H_{z2max}+H_{z2min}+4H_{z2ср})=\right.$$

$$=\frac{1}{6}(4350+840+4\cdot1610)=1938 \text{ А/м};$$

для $B_{z2max}=1{,}91$ Тл; $B_{z2ср}=1{,}64$ Тл и $B_{z2min}=1{,}37$ Тл по табл. П-20 находим $H_{z2max}=4350$ А/м; $H_{z2ср}=1610$ А/м; $H_{z2min}=840$ А/м].

Ответвление потока в паз не учитываем, так как для стали 2312 при $B_{z2max}=1{,}91$ Тл оно практически не изменяет результаты расчета.

42. По (6-120)

$$k_z=1+\frac{F_{z1}+F_{z2}}{F_\delta}=1+$$

$$+\frac{138{,}9+160{,}4}{1459}=1{,}2.$$

43. По (6-121)

$$F_a=L_aH_a=0{,}286\cdot763=218{,}2 \text{ А}$$

[по (6-122)

$$L_a=\frac{\pi(D_a-h_a)}{2p}=\frac{\pi(0{,}59-0{,}0433)}{6}=$$

$$=0{,}286 \text{ м};$$

по табл. П-19 для $B_a=1{,}45$ Тл находим $H_a=763$ А/м].

44. По (6-123)

$$F_j=L_jH_j=0{,}126\cdot180=22{,}7 \text{ А}$$

[по (6-124)

$$L_j=\frac{\pi(D_в+h_j)}{2p}=\frac{\pi(0{,}14+0{,}1)}{6}=$$

$$=0{,}126 \text{ м},$$

где по (6-125)

$$h_j=\frac{D_2-D_j}{2}-h_{п2}=\frac{0{,}4232-0{,}140}{2}-$$

$$-0{,}0414=0{,}1 \text{ м}$$

по табл. П-19 для $B_j=0{,}76$ Тл находим $H_j=180$ А/м].

45. По (6-127)

$$F_ц=F_\delta+F_{z1}+F_{z2}+F_a+F_j=1459+$$

$$+138{,}9+160{,}4+218{,}2+22{,}7=1999 \text{ А}.$$

46. По (6-128)

$$k_\mu=\frac{F_ц}{F_\delta}=\frac{1999}{1459}=1{,}37.$$

47. По (6-129)

$$I_\mu=\frac{pF_ц}{0{,}9m_1w_1k_{об1}}=\frac{3\cdot1999}{0{,}9\cdot3\cdot80\cdot0{,}925}=$$

$$=30 \text{ А};$$

по (6-130)

$$I_{\mu*}=\frac{I_\mu}{I_{1н}}=\frac{30}{143}=0{,}21.$$

Расчет параметров

48. По (6-134)

$$l_{ср1}=2(l_{п1}+l_{л1})=2(0{,}19+0{,}326)=$$

$$=1{,}032 \text{ м}$$

[по (6-138) $l_л=K_лb_{кт}+2B+h_{п1}=$

$=1{,}081\cdot0{,}219+2\cdot0{,}025+0{,}0392=$

$=0{,}326$ м, где по (6-141) $K_л=$

$$=\frac{1}{\sqrt{1-m^2}}=\frac{1}{\sqrt{1-0{,}38^2}}=1{,}081;$$

$$m=\frac{b+s}{t_1}=\frac{3{,}55+3{,}5}{18{,}54}=0{,}38; \text{ по}$$

табл. 6-20 $B=0{,}025$ м;

по (6-137)

$$b_{кт}=\frac{\pi(D+2h_{п1})}{2p}\beta_1=$$

$$=\frac{\pi(0{,}425+2\cdot0{,}0392)}{6}0{,}833=0{,}219 \text{ м}].$$

49. По (6-139)

$$l_{выл1}=K_{выл}b_{кт}+B+0{,}5h_{п1}=$$

$$=205\cdot0{,}219+0{,}025+0{,}5\cdot0{,}0392=0{,}089 \text{м}$$

[по (6-142) $K_{выл}=\frac{1}{2}K_лm=$

$$=\frac{1}{2}\cdot1{,}081\cdot0{,}38=0{,}205].$$

50. По (6-131)

$$r_1=k_r\rho_{115}\frac{L_1}{q_{эф1}a}=\frac{10^{-6}}{41}\times$$

$$\times\frac{82{,}56}{9{,}51\cdot10^{-6}\cdot3}=0{,}0706 \text{ Ом}$$

$[L_1=w_1l_{ср1}=80\cdot1{,}032=82{,}56$ м];

$$r_{1*}=r_1\frac{I_{1н}}{U_{1н}}=0{,}0706\frac{143}{380}=0{,}026.$$

51. По (6-134)

$$l_{ср2}=2(l_{п2}+l_{л2})=2(0{,}195+0{,}32)=$$

$$=1{,}03 \text{ м};$$

по (6-144)

$$b_{л2}=K_лb_{кт}+2B_c=1{,}1\cdot0{,}2+2\cdot0{,}05=$$

$$=0{,}32 \text{ м}$$

[по (6-141)

$$K_л = \frac{1}{\sqrt{1-m_c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}417^2}} = $$
$$= 1{,}1;$$

по (6-147)

$$m_c = \frac{b_2 + S_2}{t_2'} = \frac{3{,}8+1{,}7}{13{,}2} = 0{,}417;$$

по (6-148)

$$t_2' = \frac{\pi(D_2 - 2h_{п2})}{Z_2} = $$
$$= \frac{\pi(0{,}4232 - 2\cdot 0{,}0414)}{81} = 0{,}0132 \text{ м} = $$
$$= 13{,}2 \text{ мм};$$

по (6-146)

$$b_{кт} = \frac{\pi(D_2 - h_{п2})}{2p} = $$
$$= \frac{\pi(0{,}4232 - 0{,}0414)}{6} = 0{,}2 \text{ м}].$$

52. По (6-131)

$$r_2 = k_r\,\rho_{115}\frac{L_2}{q_{эф2}\,a_2} = \frac{10^{-6}}{41}\times$$
$$\times\frac{27{,}81}{63{,}26\cdot 10^{-6}} = 0{,}0107 \text{ Ом}$$

$[L_2 = l_{ср2}\,w_2 = 27\cdot 1{,}03 = 27{,}81$ м].

53. По (6-149)

$$r_2' = \nu_{12}\,r_2 = 8{,}24\cdot 0{,}0107 = 0{,}088 \text{ Ом}$$

[по (6-150)

$$\nu_{12} = \frac{m_1(w_1 k_{об1})^2}{m_2(w_2 k_{об2})^2} = \frac{3\cdot(80\cdot 0{,}925)^2}{3\,(27\cdot 0{,}955)^2} = $$
$$= 8{,}24];$$

$$r_{2*}' = r_2'\frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0{,}088\frac{143}{380} = 0{,}033.$$

54. По табл. 6-22 (рис. 6-38, б)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_3 - h_0}{3b}k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3h_1}{b+2b_ш} + \right.$$
$$\left. + \frac{h_ш}{b_ш}\right)k_\beta' = \frac{33{,}8 - 1{,}4}{3\cdot 9{,}8}\,0{,}906 + $$
$$+\left(\frac{0{,}7}{9{,}8} + \frac{3\cdot 3}{9{,}8+2\cdot 5{,}3} + \frac{1{,}0}{5{,}3}\right)\cdot 0{,}875 = $$
$$= 1{,}612$$

[по рис. 6-68, а с учетом данных табл. 3-7

$$h_0 = 1{,}0 + \frac{0{,}2+0{,}6}{2} = 1{,}4 \text{ мм};$$

$$h_1 = 3{,}0 \text{ мм};\quad h_2 = 0{,}5 + \frac{0{,}2+0{,}6}{4} = 0{,}7 \text{ мм};$$

$$h_3 = 35{,}2 - 2\cdot 0{,}7 = 33{,}8 \text{ мм};$$

$$h_ш = 1{,}0 \text{ мм};\quad b_ш = 5{,}3 \text{ мм};$$
$$b = 9{,}8 \text{ мм};$$

по (6-151)

$$k_\beta' = \frac{1+3\beta}{4} = \frac{1+3\cdot 0{,}833}{4} = 0{,}875;$$

по (6-153)

$$k_\beta = \frac{1}{4}\left(1+3k_\beta'\right) = \frac{1}{4}(1+3\cdot 0{,}875) = $$
$$= 0{,}906].$$

55. По (6-154)

$$\lambda_{л1} = 0{,}34\frac{q_1}{l_\delta'}(l_л - 0{,}64\beta\tau) = $$
$$= 0{,}34\frac{4}{0{,}19}(0{,}326 - 0{,}64\cdot 0{,}833\cdot 0{,}2225) = $$
$$= 1{,}484$$

$\left[\text{по (6-155)}\ l_\delta' = l_1 - 0{,}5n_{к1}\,b_{к1} = 0{,}19 \text{ м}\right].$

56. По (6-157)

$$\lambda_{д1} = \frac{t_1}{12\delta k_\delta}\xi = \frac{18{,}54}{12\cdot 0{,}9\cdot 1{,}21}\,0{,}855 = 1{,}21$$

[по (6-159)

$$\xi = k''q^2 + 2k_\beta' - k_{об1}^2(1+\Delta_z) = $$
$$= 0{,}0034\cdot 4^2 + 2\cdot 0{,}875 - 0{,}925^2(1 + $$
$$+ 0{,}11) = 0{,}855,$$

где $k''=0{,}0034$ — по рис. 6-39, в; $\Delta_z=0{,}11$ — по рис. 6-39, а для $b_ш/\delta = 5{,}3/0{,}9 = 5{,}89$ и $b_ш/t_1 = 5{,}3/18{,}54 = 0{,}29$].

57. По (4-42)

$$x_1 = 15{,}8\frac{f_1}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2\frac{l_\delta'}{pq}(\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + $$
$$+ \lambda_{д1}) = 15{,}8\frac{50}{100}\left(\frac{80}{100}\right)^2\times$$
$$\times\frac{0{,}19}{3\cdot 4}(1{,}612 + 1{,}484 + 1{,}21) = 0{,}345 \text{ Ом};$$

$$x_{1*} = x_1\frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0{,}345\frac{143}{380} = 0{,}128.$$

58. По табл. 6-22 и рис. 6-38, в

$$\lambda_{п2} = \frac{h_3 - h_0}{3b_п}k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_п} + \frac{3h_1}{b_п + 2b_ш} + \right.$$
$$\left. + \frac{h_ш}{b_ш}\right)k_\beta' = \frac{35{,}5 - 1{,}6}{3\cdot 5{,}8} + \frac{1{,}2}{5{,}8} + $$
$$+ \frac{3\cdot 2{,}5}{5{,}8 + 2\cdot 1{,}5} + \frac{1}{1{,}5} = 3{,}674$$

[по рис. 6-68, б с учетом данных табл. 3-11

$$h_0 = 0{,}5 + \frac{2{,}2}{2} = 1{,}6 \text{ мм};\quad h_1 = 2{,}5 \text{ мм};$$

$$h_2 = 0{,}5 + \frac{2{,}2}{4} + 0{,}15 = 1{,}2 \text{ мм};$$

$$h_з = 37{,}9 - 2 \cdot 1{,}2 = 35{,}5 \text{ мм};$$
$$h_ш = 1{,}0 \text{ мм}; \quad b_ш = 1{,}5 \text{ мм}; \quad b_п = 5{,}8 \text{ мм}$$
$$k_\beta = k'_\beta = 1].$$

59. По (6-154)

$$\lambda_{л2} = 0{,}34 \frac{q_2}{l'_\delta} (l_{л2} - 0{,}46\beta_2 \tau) =$$
$$= 0{,}34 \frac{4{,}5}{0{,}195} (0{,}32 - 0{,}46 \cdot 0{,}2225) = 1{,}708;$$

по (6-156)

$$l'_\delta = l_2 - 0{,}5 n_{к2} b_{к2} = 0{,}195 \text{ м}.$$

60. По (6-157)

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{16{,}41}{12 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}21} 1{,}458 = 1{,}831$$

[по (6-160)

$$\xi = k'' q^2 + 2k''_\beta - k^2_{об2} \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_z \right) =$$
$$= 0{,}0215 \cdot 4{,}5^2 + 2 \cdot 0{,}63 - 0{,}955^2 \left(\frac{1}{2^2} + \right.$$
$$\left. + 0{,}01 \right) = 1{,}458; \text{ по рис. 6-39,в для } \beta =$$
$$= 1 \; k'' = 0{,}0215; \text{ по рис. 6-39,г для } \frac{c}{d} =$$
$$= \frac{1}{2} \text{ и } \beta = 1 \; k''_\beta = 0{,}63; \text{ по рис. 6-39,а для}$$
$$\frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{1{,}5}{0{,}9} = 1{,}67 \text{ и } \frac{b_{ш2}}{t_2} =$$
$$= \frac{1{,}5}{16{,}41} = 0{,}091 \Delta_z = 0{,}01].$$

61. По (4-42)

$$x_2 = 15{,}8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{p_2 q_2} (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} +$$
$$+ \lambda_{д2}) = 15{,}8 \frac{50}{100} \left(\frac{27}{100} \right)^2 \times$$
$$\times \frac{0{,}195}{3 \cdot 4{,}5} (3{,}674 + 1{,}708 + 1{,}831) = 0{,}06 \text{ Ом}.$$

62. По (6-162)

$$x'_2 = \nu_{12} x_2 = 8{,}24 \cdot 0{,}06 = 0{,}494 \text{ Ом};$$
$$x'_{2*} = x_2 \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0{,}494 \frac{143}{380} = 0{,}186.$$

63. По (6-180)

$$x_{12} = \frac{U_{1н}}{I_\mu} - x_1 = \frac{380}{30} - 0{,}345 =$$
$$= 12{,}32 \text{ Ом};$$
$$x_{12*} = x_{12} \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 12{,}32 \frac{143}{380} = 4{,}64.$$

64. По (6-179)

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{m I^2_\mu} = \frac{977{,}6}{3 \cdot 30} = 0{,}361 \text{ Ом}$$

[$P_{ст.осн}$ — см. п. 65 расчета];

$$r_{12*} = r_{12} \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0{,}361 \frac{143}{380} = 0{,}136.$$

Расчет потерь

65. По (6-183)

$$P_{ст.осн} = p_{1{,}0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \left(k_{да} B^2_a m_a + k_{дz} \times \right.$$
$$\left. \times B^2_{zср} m_{z1} \right) = 1{,}75 \left(\frac{50}{50} \right)^{1{,}4} (1{,}6 \cdot 1{,}45^2 \times$$
$$\times 104{,}7 + 1{,}8 \cdot 1{,}62^2 \cdot 43{,}7) = 977{,}6 \text{ Вт}$$

[из табл. 6-24 для стали 2312

$$p_{1/50} = 1{,}75 \text{ Вт/кг}; \quad \beta = 1{,}4 \cdot k_{да} = 1{,}6;$$
$$k_{дz} = 1{,}8;$$

по (6-184)

$$m_a = \pi (D_a - h_a) h_a l_{ст1} k_с \gamma_с = \pi (0{,}59 -$$
$$- 0{,}0433) \cdot 0{,}0433 \cdot 0{,}19 \cdot 0{,}95 \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 =$$
$$= 104{,}7 \text{ кг, где } h_a = 0{,}5 (D_a - D) - h_{п1} =$$
$$= 0{,}5 (0{,}59 - 0{,}425) - 0{,}0392 = 0{,}0433 \text{ м};$$

по (6-185)

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1ср} Z_1 l_{ст1} k_с \gamma_с = 0{,}0392 \cdot 10{,}45 \times$$
$$\times 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0{,}19 \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 = 43{,}7 \text{ кг};$$
$$b_{z1ср} = \frac{b_{z1max} + b_{z1min}}{2} = \frac{12{,}16 + 8{,}74}{2} =$$
$$= 10{,}45 \text{ мм} = 10{,}45 \cdot 10^{-3} \text{ м}].$$

66. По (6-190)

$$P_{пов2} = p_{пов2} (t_2 - b_{ш2}) Z_2 l_{ст2} =$$
$$= 674{,}7 (16{,}41 - 1{,}5) \cdot 10^{-3} \cdot 81 \cdot 0{,}195 =$$
$$= 158{,}8 \text{ Вт}$$

[по (6-188)

$$p_{пов2} = 0{,}5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10\,000} \right)^{1{,}5} (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2 =$$
$$= 0{,}5 \cdot 1{,}8 \left(\frac{72 \cdot 1000}{10\,000} \right)^{1{,}5} (0{,}336 \cdot 18{,}54)^2 =$$
$$= 674{,}7 \text{ Вт/м}^2,$$

где по (6-186) $B_{02} = \beta_{02} k_\delta B_\delta = 0{,}33 \cdot 1{,}21 \times$
$\times 0{,}842 = 0{,}336$ Тл;

по рис. 6-41 для $\frac{b_{ш1}}{\delta} = \frac{5{,}3}{0{,}9} = 5{,}9$

находим $\beta_{02} = 0{,}33$].

67. По (6-196)

$$B_{пул2} = 0{,}11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{пул2} \right)^2 m_{z2} =$$
$$= 0{,}11 \left(\frac{72 \cdot 1000}{1000} 0{,}143 \right)^2 \cdot 42{,}98 = 501{,}2 \text{ Вт}$$

[по (6-197)

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2ср} Z_2 l_{ст2} k_c \gamma_c = 41,4 \cdot 10^{-3} \times$$
$$\times 0,00887 \cdot 81 \cdot 0,195 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 42,98 \text{ кг},$$

где $b_{z2ср} = \dfrac{b_{z2max} + b_{z2min}}{2} =$

$$= \frac{10,34 + 7,4}{2} = 8,87 \text{ мм};$$

по (6-192)

$$B_{пул2} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_2} B_{z2ср} =$$

$$= \frac{3,18 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 16,41 \cdot 10^{-3}} 1,64 = 0,143,$$

где $\gamma_1 = 3,18$ — из п. 39 расчета].

68. По (6-198)

$$P_{ст,доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} =$$
$$= 158,8 + 501,2 = 660 \text{ Вт};$$

по (6-199)

$$P_{ст} = P_{ст,осн} + P_{ст,доб} = 977,6 +$$
$$+ 660 = 1637,6 \text{ Вт}.$$

69. По (6-206)

$$P_{мех} = 1,2 \cdot 2p\tau^3 (n_к + 11) \cdot 10^3 =$$
$$= 1,2 \cdot 6 \cdot 0,2225^3 \cdot 11 \cdot 10^3 = 907,1 \text{ Вт}.$$

70. По (6-209)

$$P_{тр.щ} = k_{тр} \rho_{щ} S_{щ} v_к =$$
$$= 0,16 \cdot 17 \cdot 10^3 \cdot 96 \cdot 10^{-4} \cdot 10,47 = 273,4 \text{ Вт}$$

[по табл. П-39 для щеток М20 $\rho_щ = 17 \cdot 10^3$ Па, $J_щ = 12$ А/см², площадь щеток на одно кольцо

$$S'_щ = \frac{I_2}{J_щ} = \frac{369,6}{12} = 30,8 \text{ см}^2;$$

по табл. П-34 принимаем $l_щ = 20$ мм; $b_щ = 32$ мм; число щеток на одно кольцо

$$n_щ = \frac{S'_щ}{b_щ l_щ} = \frac{30,8}{2 \cdot 3,2} = 4,8 \approx 5; \text{ уточняем:}$$

$$J_щ = \frac{I_2}{b_щ l_щ n_щ} = \frac{369,6}{2 \cdot 3,2 \cdot 5} = 11,55 \text{ А/см}^2;$$

площадь щеток на три кольца

$$S_щ = b_щ l_щ n_щ m = 2 \cdot 3,2 \cdot 5 \cdot 3 =$$
$$= 96 \text{ см}^2 = 96 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

диаметр колец $D_{кл} = 0,2$ м; линейная скорость кольца

$$V_{кл} = \frac{\pi D_{кл} n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,2 \cdot 1000}{60} = 10,47 \text{ м/с}.$$

71. $P_{ст} + P_{мех} + P_{тр,щ} = 1,64 + 0,91 + 0,27 = 2,82$ кВт.

72. $P_{доб,н} = 0,005 P_{1н} = 0,005 \dfrac{P_{2н}}{\eta} =$

$$= 0,005 \frac{132}{0,92} = 0,72 \text{ кВт}.$$

Холостой ход

73. По (6-212)

$$I_{х,х} = \sqrt{I^2_{х.х.а} + I^2_{х.х.р}} =$$
$$= \sqrt{2,64^2 + 30^2} = 30 \text{ А}$$

$[I_{х.х.р} = I_\mu = 30$ А;

по (6-213)

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ} + P_{э1х.х}}{mU_{1н}} =$$

$$= \frac{2820 + 190,6}{3 \cdot 380} = 2,64 \text{ А, где по (6-214)}$$

$$P_{э1х.х} = 3 I^2_\mu r_1 = 3 \cdot 30^2 \cdot 0,0706 = 190,6 \text{ Вт}].$$

74. По (6-215)

$$\cos \varphi_{х.х} = \frac{I_{х.х.а}}{I_{х.х}} = \frac{2,64}{30} = 0,09.$$

Расчет характеристик

75. По (6-218)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,345}{12,32} = 1,028;$$

по (6-223)

$$a' = c_1^2 = 1,028^2 = 1,057 \text{ Ом}; \; b' = 0;$$
$$a = c_1 r = 1,028 \cdot 0,0706 = 0,0726;$$
$$b = c_1 (x_1 + c_1 x'_2) = 1,028 (0,345 +$$
$$+ 1,028 \cdot 0,494) = 0,877;$$

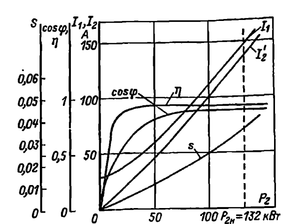


Рис. 6-69. Рабочие характеристики спроектированного двигателя, $P_2 = 132$ кВт, $2p = 6$, $U_н = 380/660$ В.

по (6-222)

$$I_{оа} = \frac{P_{ст.осн} + 3 I^2_\mu r_1}{3 U_{1н}} =$$

$$= \frac{977,6 + 3 \cdot 30^2 \cdot 0,0706}{3 \cdot 380} = 1,02 \text{ А};$$

Таблица 6-35

Расчет рабочих характеристик двигателя с фазным ротором

$P_{2н}=132$ кВт; $U_{1н}=380/660$ В; $2p=6$; $I_{1н}=143$ А; $P_{ст}+P_{мех}+P_{тр.щ}=2{,}82$ кВт; $P_{доб.н}=0{,}72$ кВт; $I_{0а}=1{,}02$ А; $I_{0р}\approx I_{\mu}=30$ А; $r_1=0{,}0707$ Ом; $r_2'=0{,}088$ Ом; $c_1=1{,}028$; $a'=1{,}057$ Ом; $a=0{,}0726$ Ом; $b=0$; $b=0{,}877$ Ом

№ п/п.	Расчетная формула	Единица	Скольжение					
			0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	$s_н=0{,}035$
1	$a'\,r_2'/s$	Ом	18,6	9,3	4,65	3,1	2,33	2,66
2	$b'\,r_2'/s$	Ом	0	0	0	0	0	0
3	$R=a+a'\,r_2'/s$	Ом	18,68	9,38	4,72	3,17	2,4	2,73
4	$X=b+b'\,r_2'/s$	Ом	0,877	0,877	0,877	0,877	0,877	0,877
5	$Z=\sqrt{R^2+X^2}$	Ом	18,7	9,4	4,81	3,29	2,55	2,87
6	$I_2''=U_{1н}/Z$	А	20,32	40,36	79,08	115,4	148,8	132,5
7	$\cos\varphi_2'=R/Z$	—	0,999	0,996	0,983	0,964	0,939	0,952
8	$\sin\varphi_2'=X/Z$	—	0,043	0,093	0,183	0,266	0,344	0,306
9	$I_{1а}=I_{0а}+I_2''\cos\varphi_2'$	А	21,32	41,22	78,76	112,3	140,7	127,2
10	$I_{1р}=I_{0р}+I_2''\sin\varphi_2'$	А	30,87	33,75	44,47	61,54	81,19	70,55
11	$I_1=\sqrt{I_{1а}^2+I_{1р}^2}$	А	37,52	53,27	90,45	128,1	162,6	145,5
12	$I_2'=c_1\,I_2''$	А	20,89	41,49	81,29	118,6	153	136,2
13	$P_1=3U_{1н}\,I_{1а}\cdot 10^{-3}$	кВт	24,3	46,99	89,79	128	160,4	145
14	$P_{э1}=3I_1^2\,r_1\cdot 10^{-3}$	кВт	0,3	0,6	1,73	3,48	5,6	4,48
15	$P_{э2}=3I_2'^2\,r_2'\cdot 10^{-3}$	кВт	0,12	0,45	1,74	3,71	6,18	3,71
16	$P_{эщ}=3\Delta U_{щ}\,I_2'\,\nu_i\cdot 10^{-3}$	кВт	0,05	0,11	0,21	0,31	0,4	0,35
17	$P_{доб}=P_{доб.н}\,(I_1/I_н)^2$	кВт	0,05	0,1	0,23	0,58	0,93	0,75
18	$\Sigma P=P_{ст}+P_{мех}+P_{тр.щ}+P_{э1}+P_{э2}+P_{э.щ}+P_{доб}$	кВт	3,34	4,08	6,73	10,9	15,9	13,3
19	$P_2=P_1-\Sigma P$	кВт	20,96	42,92	83,06	117,1	144,5	131,7
20	$\eta=1-\Sigma P/P_1$	—	0,86	0,91	0,93	0,92	0,9	0,91
21	$\cos\varphi=I_{1а}/I_1$	—	0,57	0,77	0,87	0,88	0,87	0,88

$$s_н\approx r_{2*}'=0{,}33;\quad s_{кр}=\frac{r_2'}{\dfrac{x_1}{c_1}+x_2'}=\frac{0{,}088}{\dfrac{0{,}345}{1{,}028}+0{,}494}=0{,}106.$$

Расчет характеристик проводим по формуляру (табл. 6-35). Рабочие характеристики показаны на рис. 6-69. Номинальные данные спроектированной машины: $P_{2н}=132$ кВт; $U_{1н}=380/660$ В; $I_{1н}=145$ А; $\eta=0{,}9$; $\cos\varphi=0{,}88$.

Значение $M_{max}/M_н$ находим по первым семи строкам формуляра (см. табл. 6-26). Принимаем $s_{кр}=0{,}1$:

$$R=a+a'\,r_2'/s_{кр}=0{,}726+1{,}057\frac{0{,}088}{0{,}1}=1{,}0\text{ Ом};$$

$$X=b+b'\,r_2'/s_{кр}=0{,}877\text{ Ом};$$

$$I'_2 = c_1 \frac{U_{1н}}{\sqrt{R^2 + X^2}} = = 1,028 \frac{380}{\sqrt{1 + 0,877^2}} = 293,7 \text{ А};$$

$$\frac{M_{max}}{M_н} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2н}}\right)^2 \frac{s_н}{s_{кр}} = \left(\frac{293,7}{136,2}\right)^2 \frac{0,035}{0,1} = 1,63.$$

Глава седьмая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННЫХ МАШИН

7-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронные машины имеют широкое распространение и выпускаются в большом диапазоне мощностей и частот вращения. В энергетике их применяют в качестве генераторов на электростанциях и мощность их доходит до 1200 МВт для турбогенераторов и 560 МВт для гидрогенераторов. В промышленных установках большое применение находят синхронные двигатели и генераторы.

Синхронные двигатели предназначаются для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, таких, как компрессоры, насосы, шаровые мельницы, вентиляторы, двигатель-генераторные установки и т. п.

Двигатели изготавливают как с неявнополюсными, так и с явнополюсным ротором.

В неявнополюсном исполнении синхронные двигатели — турбодвигатели выпускают с частотой вращения 3000 об/мин на мощности от 630 до 12 500 кВт. Более широкое распространение имеют явнополюсные синхронные двигатели с диапазоном частот вращения от 1500 до 100 об/мин при мощностях от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч киловатт.

Шкала мощностей выпускаемых двигателей в соответствии с ГОСТ 8585-68 и ГОСТ 8704-70 дана в табл. 7-1. Двигатели выпускают с номинальными напряжениями 380, 660, 6000 и 10 000 В.

В отдельных случаях допускается изготовление двигателей на напряжение 3000 В для мощностей, указанных в таблице для двигателей с номинальным напряжением 6000 В.

Синхронные генераторы выполняют с явнополюсными роторами и применяют в сопряжении с двигателями внутреннего сгорания, электродвигателями и пр. В табл. 7-2 в соответствии с ГОСТ 8586-68 дана шкала мощностей, частот вращения и напряжений для синхронных генераторов. Для дизель-агрегатов выпускают генераторы с частотой вращения 375 об/мин.

Кроме того, выпускают синхронные генераторы небольших мощностей от 4 до 100 кВт. Большинство выпускаемых генераторов работает с самовозбуждением и автоматической системой регулирования возбуждения.

Расчет каждого вида синхронных машин имеет свои особенности. В этой главе изложена методика расчета синхронных явнополюсных машин общего назначения.

Основное исполнение синхронных машин общепромышленного применения — с горизонтальным расположением вала. По способу защиты и вентиляции — защищенные или закрытые с самовентиляцией. Охлаждение — воздушное.

В настоящее время для синхронных машин не существует жесткой увязки мощностей с установочными размерами и высотой оси вращения, как это имеется, например, у асинхронных машин.

Синхронные машины общего назначения выпускают в виде ряда серий. Каждая серия включает в себя машины в определенном диапазоне мощностей и частот вращения, их выполняют на нескольких нормализованных внешних диаметрах

Таблица 7-1

Шкала мощностей синхронных двигателей

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин																									
	3000		1500				1000				750				600			500			375		300		250	
	Номинальное напряжение, В																									
	6000	10 000	380	660	6000	10 000	380	660	6000	10 000	380	660	6000	10 000	380	6000	10 000	380	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000	6000	10 000
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
110	—	—	—	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—
160	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—
200	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—	—	—
250	—	—	×	×	×	—	×	×	×	—	×	×	×	—	×	×	—	×	×	—	—	—	—	—	—	—
315	—	—	×	×	×	—	×	×	×	—	—	—	×	—	×	×	—	—	×	—	×	—	×	—	×	—
400	—	—	—	×	×	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	×	—	—	×	—	×	—	×	—	×	—
500	—	—	—	×	×	—	—	—	×	—	—	—	×	—	—	×	—	—	×	—	×	—	×	—	×	—
630	×	×	—	—	×	—	—	—	×	—	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
800	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
1000	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
1250	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
1600	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
2000	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
2500	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
3200	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
4000	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
5000	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
6300	×	×	—	—	—	—	—	—	×	×	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	×	×	×	×
8000	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	×	×	—	—	—	—
10 000	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	×	×	—	×	×	—	×	×	—	—	—	—	—	—
12 500	×	×	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 7-2

Шкала мощностей синхронных генераторов

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин										
	1500			1000			750		600	500	
	Номинальное напряжение, В										
	230	400	6300	230	400	6300	230	400	400	230	400
75	—	—	—	×	×	—	×	×	—	—	—
100	×	×	—	×	×	—	×	×	—	—	—
125	—	×	—	×	×	—	—	—	×	×	×
160	—	×	—	—	—	—	×	×	×	×	×
200	×	×	—	—	—	—	×	×	×	×	×
250	—	—	—	—	—	—	×	×	×	—	×
320	—	×	—	—	×	×	—	—	—	—	×
400	—	×	—	—	×	—	—	—	—	—	—
500	—	×	×	—	×	×	—	—	—	—	—
630	—	×	×	—	×	×	—	×	—	—	—
800	—	—	—	—	—	×	—	—	—	—	—

статора, которые определяют габарит машины (см. табл. 7-7). При одной и той же частоте вращения две — четыре машины близких мощностей имеют одинаковую поперечную геометрию и отличаются длиной.

В последнее время в Советском Союзе разработан, ряд новых серий, которые по своим технико-экономическим показателям превосходят ранее существовавшие и имеют уменьшенные габаритные размеры [16]. В настоящее время явнополюсные синхронные двигатели общепромышленного применения выпускают сериями СД2, СДН2, СДН3-2 и др. Серию двигателей СД2 выполняют на внешних диаметрах статора, соответствующих 13-му и 14-му габаритам (см. табл. 7-7), серию СДН2 — на диаметрах 16-го и 17-го габаритов, а серию СДН3-2 на диаметрах 18—21-го габаритов. Синхронные генераторы выпускают сериями СГ2 (13-й и 14-й габариты), СГД2 (16-й и 17-й габариты) и др. Конструктивно синхронные генераторы подобны синхронным двигателям соответствующего габарита. Кроме того, выпускают синхронные генераторы серий ОС, ЕСС, ЕСС5 и др. в диапазоне мощностей от 4 до 100 кВт (5—9-й габариты) на напряжения 230 и 400 В при частоте вращения 1500 об/мин.

7-2. КОНСТРУКЦИЯ СЕРИЙНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Как уже отмечалось, синхронные машины общепромышленного применения с явнополюсным ротором выпускают в виде отдельных серий. Каждая серия включает ряд машин в определенном диапазоне мощностей, объединенных общностью конструкции. Машины различных серий могут существенно отличаться по своей общей компоновке, но наряду с этим в выполнении отдельных узлов иметь и много общего. Конструкции современных синхронных машин средней мощности показаны на рис. 7-1—7-3. На рис. 7-4 даны фотографии некоторых машин[1].

Конструктивно машины указанных серий выполнены с различными степенями защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями и от попадания внутрь машины посторонних тел и воды. В соответствии с классификацией, предусмотренной ГОСТ 17494-72, машины серии СД2 (СГ2) имеют степень защиты IP23. Основное исполнение серии СДН2 имеет степень защиты IP11, но также имеется модификация со степенью защиты IP43. Машины серии СДН3-2 имеют закрытое исполнение со степенью защиты IP44.

Машины различаются по способу крепления и конструкции подшипниковых узлов. В машинах серии СД2 (СГ2) подшипники размещают в подшипниковых щитах и, следовательно, машины имеют форму исполнения IM1001 (по СТ СЭВ 246-76). В машинах серий СДН2 и СДН3-2 применяют стояковые подшипники, и они имеют форму исполнения IM7311. Машины серии СДН2 (рис. 7-2) выполняют без фундаментной плиты, а стояковые подшипники *1* устанавливают на нижних подшипниковых полущитах *2*, крепящихся к нижней части статора. Такое исполнение позволило сократить расстояние между подшипниками по сравнению с вариан-

[1] На рис. 7-1—7-3 одинаковые детали и узлы обозначены одинаковыми цифрами.

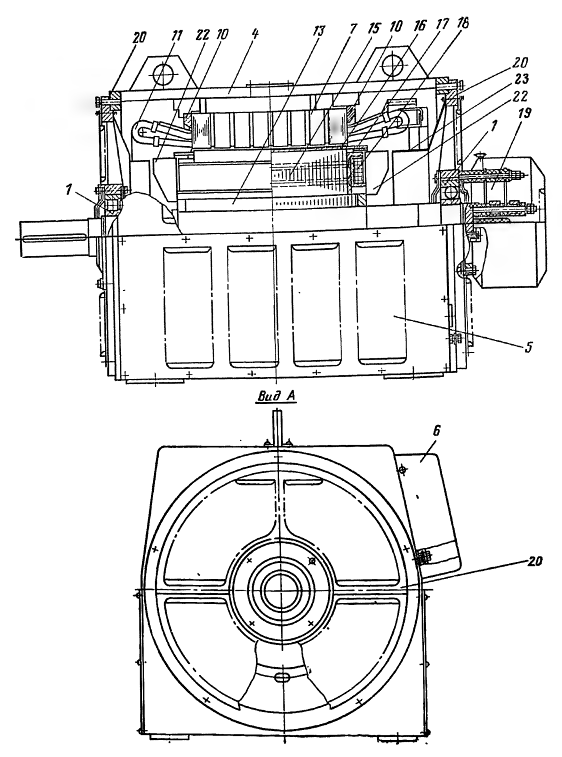


Рис. 7-1. Синхронный двигатель серии СД2.

том крепления стояковых подшипников на фундаментной плите и привело к уменьшению общей массы машины. По сравнению с вариантом расположения подшипников в подшипниковых щитах принятая конструкция также имеет преимущества, так как обеспечивает выполнение машины на подшипниках скольжения и качения с одинаковыми габаритно-установочными размерами, большую гарантию от попадания масла из подшипников скольжения в машину, уменьшает вероятность возникновения вибраций и т. д. Крепление двигателей к фундаменту производят шпильками, проходящими через отверстия в лапах станины. Двигатели серии СДНЗ-2 (рис. 7-3) вместе со стоя-

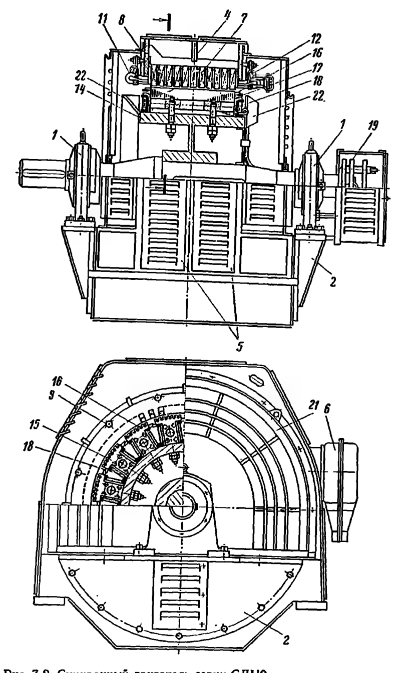


Рис. 7-2. Синхронный двигатель серии СДН2.

ковыми подшипниками *1* крепят на фундаментной плите *3* или фундаментных балках.

В машинах серии СД2 применяют подшипники качения: со стороны контактных колец — однорядные шариковые подшипники и со стороны привода — однорядные роликовые. В машинах серии СДН2 могут быть применены как подшипники скольжения, так и подшипники качения. Подшипники скольжения — стояковые с кольцевой смазкой. У применяемых подшипников сокращена осевая длина за счет отсутствия маслоуловительных козырьков. Для подшипников качения используют роликовые однорядные подшипники. В комплект подшипникового узла со стороны привода вместе с роликовым подшипником входит шариковый подшипник, который предназначен для восприятия случайных осевых нагрузок. Все машины серии СДН3-2 имеют подшипники скольжения.

Высота оси вращения для всех машин серий СДН2 и СДН3-2 рав-

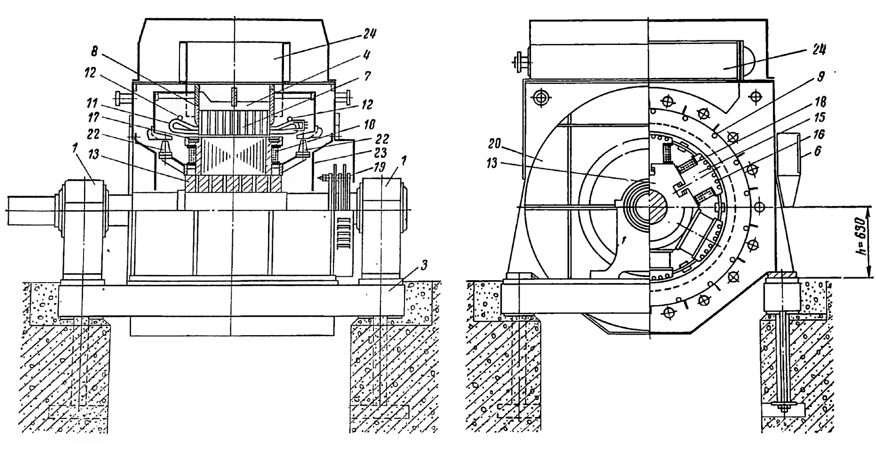
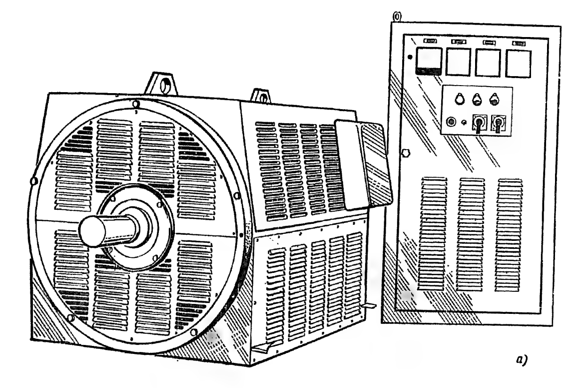


Рис. 7-3. Синхронный двигатель серии СДНЗ-2.



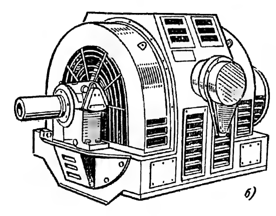


Рис. 7-4. Внешний вид синхронных двигателей.

а — СД2; *б* — СДН2

на 630 мм, а для машин серии СД2 (СГ2) — 450 мм у машин 13-го габарита и 500 мм у машин 14-го габарита.

Станины *4* всех машин сварные из листовой стали и состоят из стоек, соединенных между собой продольными ребрами жесткости, опорных лап и наружной обшивки. У машин серий СД2 и СДН2 в обшивке корпуса имеются окна *5* с жалюзи и решетками для выхода воздуха. У машин серии СДНЗ-2 обшивка корпуса глухая, в днище корпуса имеются окна для присоединения воздуховодов. На станине закрепляют коробку выводов статора с крышкой *6*. Сердечник статора *7* состоит из запрессованных в корпус станины пакетов, собранных из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Между пакетами имеются вентиляционные каналы. В машинах серии СД2 пакет собирают из целых листов, а у машин серий СДН2 и СДНЗ-2 — из сегментов. У машин серий СДН2 и СДНЗ-2 удержание магнитопровода в запрессованном состоянии обеспечивают нажимные кольца *8* и стяжные шпильки *9*, а у машин СД2 (СГ2) — нажимные шайбы *10*, соединенные между собой стяжками. Во всех машинах применена двухслойная петлевая обмотка *11*, которую укладывают в прямоугольные пазы статора. У машин серии СД2, а также у генераторов серии СГ2 и СГД2 в эти же пазы укладывают по одному проводнику дополнительной обмотки, предназначенной для питания возбудительного устройства. Пазовую часть обмотки крепят гетинаксовыми клиньями. Лобовые части обмотки в зависимости от вылета и глубины паза крепят изолированными бандажными кольцами *12*.

Роторы машин имеют два исполнения. У быстроходных машин по-

люсы сажают на остов, а у тихоходных — на магнитное колесо. Остов ротора *13* (см. рис. 7-3) выполняют шихтованным из листовой стали Ст3. У машин 13—17-го габаритов остов состоит из одного пакета, а у машин, начиная с 18-го габарита, подразделяется на несколько пакетов длиной 100 мм с промежутками между ними в 15—25 мм. Магнитное колесо *14* (см. рис. 7-2) выполняют сварным из толстолистовой стали Ст3.

Полюсы быстроходных машин крепят к остову ротора Т-образными хвостовиками, а в некоторых машинах — хвостовиками в виде ласточкина хвоста. Полюсы тихоходных машин крепят к ободу магнитного колеса шпильками и гайками.

Сердечники полюсов *15* выполняют шихтованными из тонколистовой стали Ст3 толщиной 1 и 1,4 мм. Запрессовку сердечника полюса осуществляют с помощью литых нажимных щек и заклепок. Сердечники полюсов бесхвостового исполнения имеют массивный центральный стержень, в который заворачивают крепящие полюс шпильки.

Демпферную (пусковую) клетку *16* выполняют из медных стержней, расположенных в полузакрытых пазах сердечников полюсов, припаянных к дугообразным сегментам *17* и выполненных из полосовой меди, гнутой плашмя. У некоторых двигателей часть пазов заполняют латунными стержнями. Соединение короткозамыкающих сегментов соседних полюсов быстроходных машин производят встык с помощью соединительных накладок с дополнительным креплением соединения шпилькой к остову ротора. Короткозамыкающие сегменты тихоходных машин соединяют между собой внахлест.

Обмотки возбуждения *18* состоят из катушек, изготовленных из голой полосовой меди, намотанной на ребро. Между витками прокладывают изоляцию из асбестовой бумаги.

Контактные кольца *19* подвесного типа изготовляют из стали марки Ст3 или чугуна и крепят на конце вала за подшипниковым узлом у машин 13—17-го габаритов и между подшипниковыми стояками у машин начиная с 18-го габирита (серия СДНЗ-2).

Подшипниковые щиты *20* у машин серии СД2 (СГ2) (см. рис. 7-1) сварные, центрируют замками в станине. В щитах имеются окна с жалюзи, через которые входит охлаждающий машину воздух. В серии СДН2 (см. рис. 7-2) нижние подшипниковые полущиты *2* в машинах 16-го габарита изготовляют литыми из чугуна, а у машин 17-го габарита приняты сварные полущиты. В полущитах предусматривают вентиляционные окна, служащие также для измерения воздушного зазора. Предохранительные щиты *21* прикрепляют к верхним торцевым частям станины, и их конструкция определяется необходимостью обеспечения заданной степени защиты машины.

При степени защиты IP11 вентиляционные окна, расположенные на цилиндрической поверхности щитов, закрыты жалюзи, окна на торцевых поверхностях — решетками, сваренными из концентрически расположенных круглых прутков и радиальных ребер. Для предотвращения попадания внутрь двигателя воды, стекающей по торцевой поверхности щита, предусмотрены обтекатели. Щиты машин исполнения IP43 отличаются от щитов машин основного исполнения только отсутствием вентиляционных окон.

В машинах серии СДНЗ-2 применяют плоские разъемные щиты *20* (см. рис. 7-3) из листовой стали толщиной 5 мм. Для увеличения жесткости щиты имеют горизонтальные и вертикальные ребра из полосовой стали.

Во всех сериях применяют воздушное охлаждение с самовентиляцией. В машинах серии СД2 принята согласная радиальная система вентиляции. В серии СДН2 применена согласная система вентиляции, причем при активной длине магнитопровода статора меньше 44 см используют аксиально-радиальную схему, а при длинах больше 44 см — радиальную. У закрытых машин се-

рии СДН3-2 вентиляция происходит по замкнутому циклу через встроенный воздухоохладитель *24*, который у большинства машин размещают в верхней части корпуса. ную аксиально-радиальную систему с коническим вентилятором, при скоростях от 20 до 30 м/с, но при длине статора свыше 41 см, — согласную радиальную с коническим

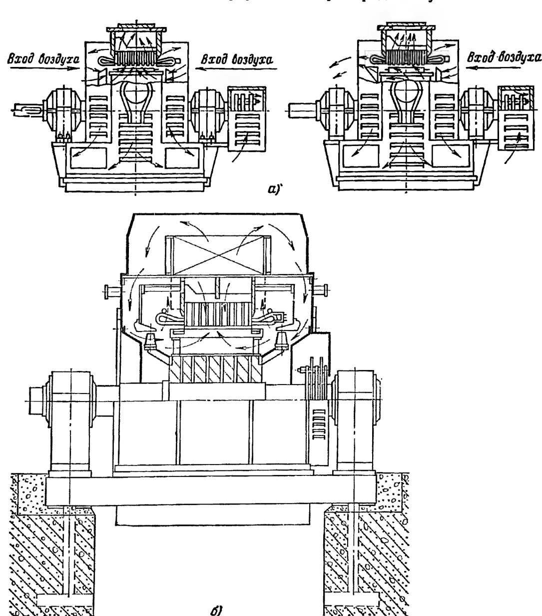


Рис. 7-5. Схемы вентиляции.

а — защищенных машин СДН2; *б* — закрытых машин СДН3-2.

Схему вентиляции для машин серии выбирают в зависимости от окружной скорости ротора и длины статора. При окружных скоростях ротора более 40 м/с применяют согласную радиальную вентиляцию с осевым вентилятором, при скоростях от 20 до 35 м/с и активной длине статора машины до 40 см — согласвентилятором. Вентиляторы машин *22* прикрепляют к ободу ротора. Для направления потока воздуха к подшипниковым щитам некоторых машин прикрепляют диффузоры *23*. На рис. 7-5, *а* в качестве примера показана схема согласной радиальной (левый рисунок) и согласной аксиально-радиальной вентиля-

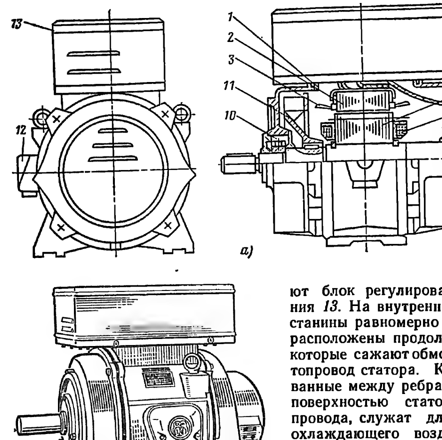


Рис. 7-6. Синхронный генератор серии ЕСС.
а — чертеж общего вида; *б* — внешний вид.

ции (правый рисунок) для защищенных машин, а на рис. 7-5, *б* — согласной радиальной вентиляции для закрытых машин.

На рис. 7-6, *а* дана конструкция синхронного генератора серии ЕСС, а на рис. 7-6, *б* — его фотография. Генераторы изготавливают в горизонтальном защищенном исполнении. По способу крепления и конструкции подшипниковых узлов генераторы имеют две формы исполнения: IM1001 (на лапах с двумя одинаковыми подшипниковыми щитами) и IM2101 (на лапах с фланцевым подшипниковым щитом со стороны вала). Станина генератора *1* — чугунная, литая. В верхней ее части имеется проем прямоугольной формы, над которым устанавливают блок регулирования напряжения *13*. На внутренней поверхности станины равномерно по окружности расположены продольные ребра, на которые сажают обмотанный магнитопровод статора. Каналы, образованные между ребрами и наружной поверхностью статорного магнитопровода, служат для прохождения охлаждающего воздуха. Вентиляция генератора — аксиальная, вытяжная. Воздух забирается центробежным вентилятором *11* через отверстия в щите, расположенном со стороны контактных колец. Подшипниковые щиты *4* — чугунные, литые. В нижних частях щитов расположены окна для прохождения воздуха. Окна защищены сетками, штампованными из листовой стали. Для увеличения размеров окон нижняя часть щитов расширена.

В подшипниковых щитах располагают подшипники *10*. Со стороны привода применяют роликоподшипники, а со стороны колец — шарикоподшипники. В генераторах 5-го габарита установлены шарикоподшипники с одной и другой стороны.

Магнитопровод статора *2* собирают из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Собранный в пакет магнитопровод после опрессовки удерживается шестью продольными скобками, которые на торцах приваривают к нажимным кольцам. Магнитопровод впрессовывают в станину и закрепляют от проворачивания винтом.

В полузакрытых пазах статора уложена всыпная петлевая двухслойная обмотка *3* из медного круглого провода марки ПСД. Изоляция обмотки и паза соответствует классу нагревостойкости. В.

Сердечник ротора *5* собирают из листов электротехнической стали, которые имеют форму звезды с числом лучей (выступов) *1*, равным числу полюсов (рис. 7-7, *а*). Листы используют двух видов, отличающихся друг от друга высотой выступов. Из той же стали штампуют сегменты *2*, имеющие форму полюсных наконечников. По длине сердечник состоит из чередующихся пакетов, состоящих из листов с короткими или длинными выступами. Крайние пакеты с короткими выступами собраны из листов тонколистовой стали толщиной 2 мм.

Собранный и спрессованный магнитопровод закрепляют на валу с помощью шпонки, а с торцов — двумя пружинными кольцами.

Катушки обмотки возбуждения *6* (рис. 7-6, *а*) наматывают из прямоугольной меди и после предварительной изоляции полюсных сердечников надевают на них. Сверху и снизу катушек устанавливают изолирующие шайбы. Под нижнюю шайбу подкладывают стальную пружинящую рамку, предохраняющую от перемещения катушки относительно сердечника. После установки катушек на полюса зашихтовывают пакеты сегментов полюсных наконечников *2* (рис. 7-7, *б*). Сегменты с сердечниками крепят посредством двух продольных шпилек *3*, проходящих через отверстия сегментов и высоких пакетов. При этом наружные размеры сегментов и высоких пакетов строго совпадают, образуя внешнюю поверхность ротора. Между сегментами по краям полюсов остаются воздушные промежутки, равные толщине высоких пакетов.

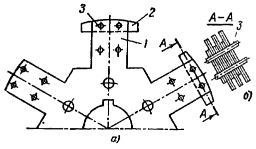


Рис. 7-7. Ротор синхронного генератора серии ЕСС.

На выступающие из полюсов концы шпилек устанавливают силуминовые втулки, удерживающие торцевые части катушек от изгибания.

Выводные провода обмотки ротора пропускают через вал, конец которого со стороны колец полый (сверленый), и соединяют с контактными кольцами *8* (см. рис. 7-6, *а*), изготовленными из латуни. Кольца с контактными шпильками запрессовывают в изоляционном прессматериале на стальную втулку, которая служит для посадки контактных колец на конец вала. Втулку на валу закрепляют от проворачивания призматической шпонкой, а от осевого смещения — установленным на валу пружинным кольцом. Кольца закрывают штампованным из листовой стали кожухом *7*. На подшипниковом щите со стороны колец крепят чугунное кольцо, которое стягивает крышку подшипника. В кольцо ввинчивают одну или две шпильки, опрессованные в изоляционный прессматериал. На шпильки крепят по две траверсы *9*, каждая из которых имеет два щеткодержателя со щетками марки ЭГ14 размером 10×12,5 мм. Блок регулирования напряжения *13* устанавливают над проемом в станине. В нем устанавливают выпрямители цепи возбуждения, трансформаторы тока, дроссель цепи компаундирования и конденсаторы для самовозбуждения.

На станине располагают коробку выводов *12* для присоединения внешних проводов.

7-3. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

При анализе работы синхронных машин и при построении их характеристик широко используют систему относительных единиц. В этом случае напряжения, ЭДС, сопротивления, мощности и т. д. выражают не в физических единицах, а в величинах, являющихся их отношениями к соответствующему значению, которое принимают за

базовое. Обычно для токов и напряжения статора за базовые значения принимают их номинальные фазные значения $I_{н,ф}$ и $U_{н,ф}$, а для мощности — полную номинальную мощность $S_н=mU_{н,ф}$, $I_{н,ф}$. Сопротивления обмоток относят к базовому сопротивлению, равному отношению номинального фазного напряжения к номинальному фазному току. За базовый момент принимают отношение $M_б=S_н/\Omega_н$ ($\Omega_н$ — угловая синхронная скорость).

Для того чтобы выразить в относительных единицах величины и параметры роторных контуров, их нужно предварительно привести к числу витков обмотки статора, а затем разделить на соответствующее указанное выше базовое значение этой величины.

Величины, выраженные в относительных единицах, обозначают соответствующим индексом со звездочкой. Так, ток в относительных единицах будет обозначаться I_*, индуктивное сопротивление x_* и т. д.

Применение относительных единиц делает анализ работы машины более наглядным и обобщенным.

7-4. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

При разработке электрической машины задаются рядом исходных величин, которые будут являться номинальными данными спроектированной машины. Для синхронной машины такими данными являются:

1. Номинальная мощность. Для двигателей этой мощностью является механическая мощность на валу $P_н$ в киловаттах. Иногда еще задается полная мощность $S_н$ в киловольт-амперах. Для генераторов за номинальную мощность принимается электрическая отдаваемая мощность $S_н$ в киловольт-амперах, а также ее активная составляющая $P_н$ в киловаттах.

2. Номинальное линейное напряжение $U_н$, В или кВ.

3. Число фаз и схема соединения обмотки статора (звезда или треугольник). Чаще всего применяется схема соединения звезда.

4. Номинальная частота вращения $n_н$, об/мин.

5. Частота f, Гц.

6. Коэффициент мощности $\cos\varphi$. Обычно $\cos\varphi=0{,}9$ при опережающем токе для двигателей и $\cos\varphi=0{,}8$ при отстающем — для генераторов.

Кроме того, в некоторых случаях могут быть заданы некоторые дополнительные данные: момент инерции J, система вентиляции, пусковые условия, конструктивный тип и т. д.

Как уже отмечалось, серии общепромышленных синхронных машин в Советском Союзе выпускают чаще всего в защищенном исполнении с горизонтальным расположением вала. Поэтому в приведенной ниже методике расчета будут рассматриваться машины такого типа.

7-5. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Проектирование синхронных машин, как, впрочем, и любой другой электрической машины, начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины l_δ. Задача эта не имеет однозначного решения, так как при выборе главных размеров приходится учитывать ряд требований. Поэтому для нахождения оптимальных значений D и l_δ приходится в некоторых случаях просчитывать ряд вариантов. Для сокращения числа рассчитываемых вариантов целесообразно воспользоваться рекомендациями, полученными на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации подобных машин. Для предварительного определения диаметра D можно воспользоваться построенными в логарифмическом масштабе зависимостями $D=f(S'_н)$ (рис. 7-8), которые соответствуют усредненным диаметрам выполненных машин.

Расчетную электромагнитную мощность $S'_н$ определяют по формулам:

$$\left.\begin{aligned} &\text{для двигателя } S'_н=\frac{k_E P_н}{\eta\cos\varphi};\\ &\text{для генератора } S'_н=\frac{k_E P_н}{\cos\varphi}.\end{aligned}\right\}\quad(7\text{-}1)$$

Коэффициент k_E представляет собой отношение ЭДС в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению. Он зависит от $\cos\varphi$ и от сопротивления обмотки статора. При работе синхронного двигателя с опережающим током и $\cos\varphi=0{,}9$ можно принять $k_E \approx \approx 1{,}05 \div 1{,}06$; для генераторов, работающих с отстающим током и $\cos\varphi=0{,}8$, принимают $k_E \approx 1{,}08$.

Коэффициент полезного действия η для двигателей предварительно можно взять из табл. 7-3, где даны значения КПД для серийно выпускаемых синхронных двигателей при номинальном напряжении $U_н=6000$ В. При $U_н=380$ В КПД двигателей увеличивается на 0,3—1%, а при $U_н=10\,000$ В снижается на 0,05—0,2%. Коэффициенты полезного действия выпускаемых в настоящее время синхронных генераторов при $\cos\varphi=0{,}8$ и $U_н=400$ В даны в табл. 7-4.

При других значениях мощности, частоты вращения и напряжения предварительное значение КПД генераторов при $\cos\varphi=0{,}8$ можно получить по табл. 7-3, снизив найденное значение на 0,2—0,7%. В табл. 7-5 даны КПД для генераторов мощностью до 100 кВт.

По найденному диаметру определяют полюсное деление

$$\tau = \pi D/2p, \qquad (7\text{-}2)$$

где $p=60f/n_н$.

Предварительное значение внешнего диаметра статора D_a находят по формуле

$$D_a = K_д D. \qquad (7\text{-}3)$$

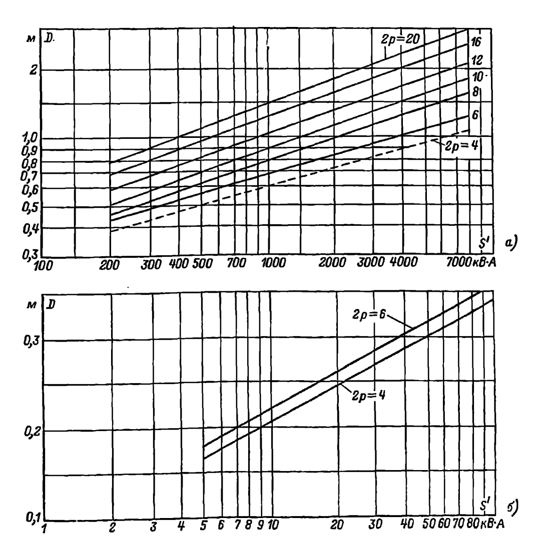


Рис. 7-8. Зависимость $D=f(S')$ при различных числах полюсов.
а — при $S'>100$ кВ·А; б — при $S\leq 100$ кВ·А.

Таблица 7-3

Значения КПД, %, для синхронных двигателей при $\cos\varphi=0{,}9$ и номинальном напряжении 6000 В

$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	—	94,2	93,9	93,4	—	91,25	91,27	90,8
400	—	94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	—	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,4	95	95	94,4	94,45
1250	—	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	—	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95,0
2000	—	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	—	96,8	96,7	96,6	96,5	96,23	95,72	95,65
3200	—	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	—	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	—	97,3	97,2	97,09	97,07	—	—	—

Таблица 7-4

Значения КПД, %, синхронных генераторов при $\cos\varphi=0{,}8$ и номинальном напряжении $U_н=400$ В

$P_н$, кВт	$n_н$, об/мин			
	1000	600	500	375
125	—	—	90,5	—
160	—	91,3	—	—
200	—	—	91,9	—
250	93	92,6	—	—
315	—	—	92,7	—
400	—	—	—	92,6
500	—	—	—	93,4
630	—	—	—	93,8
800	—	—	—	94,1

зованного диаметра, значения которого даны в табл. 7-7. Нормализованные диаметры получены исходя из наиболее благоприятного раскроя листов электротехнической стали, при котором уменьшаются отходы при штамповке. Нормализованным диаметром определяется габарит машины.

От выбранного внешнего диаметра магнитопровода статора D_a зависит высота оси вращения h у проектируемой машины. Высоты осей вращения в зависимости от D_a для выпускаемых в настоящее вре-

Таблица 7-5

Значения КПД, %, синхронных генераторов при $\cos\varphi=0{,}8$, номинальном напряжении 230 и 400 В и номинальной частоте вращения $n_н=1500$ об/мин

$P_н$, кВт	4	8	12	16	20	30	50	60	75	100
η, %	80	82,2	86	87	87,5	88	90	90,5	91	92,5

Таблица 7-6

$2p$	4	6	8	10	12	16
$K_д$	1,43—1,52	1,4—1,45	1,35—1,4	1,3—1,35	1,28—1,33	1,22—1,28

Коэффициент $K_д$ в зависимости от числа полюсов машины имеет следующие значения (табл. 7-6).

Полученное значение D_a следует округлить до ближайшего нормали-

мя синхронных машин даны в табл. 7-7. Машины, выполненные на диаметрах D_a от 1180 мм и выше, имеют высоту оси вращения $h=630$ мм, что достигается соответст-

Таблица 7-7

Габарит	Диаметр, мм	Высота оси вращения, мм
5	280	180
6	327	200
7	393	225
8	423	250
9	493	280
10	520	315
11	590	355
12	660	400
13	740	450
14	850	500
15	990	560
16	1180	630
17	1430	630
18	1730	630
19	2150	630
20	2600	630
21	3250	630

вующей приваркой лап к станине (см. рис. 7-3).

Если в результате округления отношение D_a/D будет выходить за пределы значений коэффициента $K_д$, то следует произвести пересчет внутреннего диаметра D и полюсного деления τ:

$$D = D_a/K_д; \quad \tau = \pi D/2p. \qquad (7\text{-}4)$$

В этом случае для $K_д$ можно взять среднее значение при данном числе полюсов.

По полученному диаметру D находят расчетную длину машины, м:

$$l_\delta = \frac{6,1 S_н'}{\alpha_\delta k_B k_{об1} A B_{\delta н} D^2 n_н}, \qquad (7\text{-}5)$$

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия (по рис. 7-21);
k_B — коэффициент формы поля (по рис. 7-21);
$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора;
D — внутренний диаметр статора, м;
A — линейная нагрузка статора, А/м;
$B_{\delta н}$ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, Тл.

Как α_δ, так и k_B зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, а также воздушного зазора и полюсного деления. Поскольку на данной стадии расчета эти значения не известны, то предварительно можно принять $\alpha_\delta = 0,65 \div 0,68$, $k_B = 1,16 \div 1,14$, а их произведение $\alpha_\delta k_B = 0,75 \div 0,78$ (эти значения соответствуют $\alpha = 0,68 \div 0,72$, $\delta_m/\delta = 1,5$ и $\delta/\tau \approx 0,01$). При равномерном воздушном зазоре над полюсным наконечником в маши-

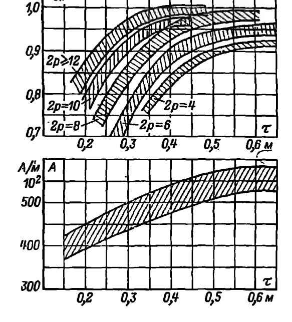


Рис. 7-9. Зависимость $B_{\delta н}$ и A от τ для синхронных машин мощностью $P_н > 100$ кВт.

нах небольшой мощности (менее 100 кВт) $\delta_m/\delta = 1$ и можно принять $\alpha_\delta k_B = 0,84 \div 0,87$.

Обмоточный коэффициент $k_{об1}$ определяют по шагу обмотки статора и числу пазов на полюс и фазу. Предварительно $k_{об1}$ можно взять равным 0,92, что примерно соответствует шагу обмотки $y = 0,83\tau$.

Линейную нагрузку A и индукцию $B_{\delta н}$ для машин мощностью от 100—150 кВт и выше выбирают по кривым рис. 7-9, где приведенные зависимости получены для серийно выпускаемых синхронных машин с номинальным напряжением 6000—6600 В. Эти же зависимости соответствуют машинам и при номинальном напряжении 380—400 В. При номинальном напряжении 10 000 В индукцию $B_{\delta н}$ можно также выбирать по кривым рис. 7-9, а линейную нагрузку целесообразно

снизить на 10—15%, так как из-за более толстой пазовой изоляции ухудшается охлаждение проводников обмотки якоря.

Значения индукции $B_{\delta н}$ и линейной нагрузки A для машин мощностью менее 100 кВт выбирают по рис. 7-10.

Найденные из рис. 7-9 или 7-10 значения A и $B_{\delta н}$ следует рассматривать как предварительные. В

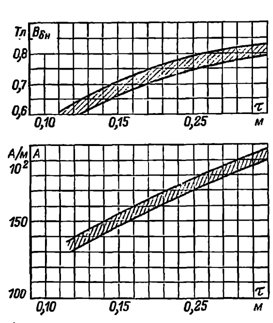


Рис. 7-10. Зависимость $B_{\delta н}$ и A от τ для синхронных машин мощностью менее 100 кВт.

дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует иметь в виду, что в зависимости от выбора A и $B_{\delta н}$ изменяется активный объем $D^2 l_\delta$ проектируемой машины. Чем больше произведение $AB_{\delta н}$, тем меньший объем будет иметь машина. Однако как A, так и $B_{\delta н}$ имеют свои верхние пределы.

Основным фактором, ограничивающим линейную нагрузку, является нагрев обмотки, так как с возрастанием A в ней увеличиваются электрические потери. Допустимое значение линейной нагрузки зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции, а также от конструктивного выполнения машины и прежде всего от способов ее охлаждения. Приведенные на рис. 7-9 и 7-10 значения A получены по данным выпускаемых в настоящее время синхронных машин защищенного исполнения с косвенным воздушным охлаждением, имеющих изоляцию класса нагревостойкости В.

Верхний предел индукции $B_{\delta н}$ ограничен главным образом насыщением магнитной цепи и в первую очередь насыщением зубцового слоя.

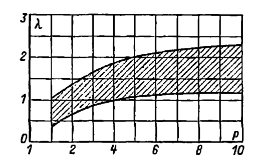


Рис. 7-11. Значения $\lambda = l_\delta/\tau$ в зависимости от числа пар полюсов.

Следует также отметить, что от отношения $A/B_{\delta н}$ зависят индуктивные сопротивления обмотки. С увеличением этого отношения индуктивные сопротивления возрастают.

Определив расчетную длину машины l_δ, находят отношение

$$\lambda = l_\delta/\tau. \qquad (7\text{-}6)$$

От λ зависят ряд показателей машины и условия ее охлаждения. Чем длиннее машина (больше λ), тем хуже условия ее охлаждения. Значение λ для выпускаемых в настоящее время синхронных машин обычно лежит в пределах, указанных на рис. 7-11. У машин небольшой мощности при l_δ меньше 250—300 мм, а у более крупных машин меньше 200 мм магнитопровод статора выполняется из одного пакета.

При большей длине в целях улучшения охлаждения сталь статора разбивают на несколько пакетов, между которыми делают радиальные вентиляционные каналы (рис. 7-12). Обычно длину пакетов $l_{пак}$ выбирают равной 4—5 см, а ширину канала $b_к = 1$ см. При наличии вентиляционных каналов истинная длина статора будет боль-

ше расчетной и может быть найдена по формуле

$$l_1 \approx (1{,}05 \div 1{,}08)\, l_\delta \,. \qquad (7\text{-}7)$$

Длину всех пакетов чаще всего берут одинаковой. Число вентиляционных каналов в этом случае будет равно:

$$n_\text{к} = \frac{l_1 - l_\text{пак}}{l_\text{пак} + b_\text{к}}, \qquad (7\text{-}8)$$

причем $n_\text{к}$ округляют до целого числа.

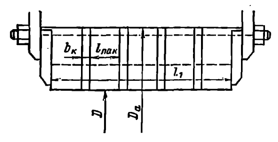


Рис. 7-12. Размеры активной стали статора.

Определив число каналов, уточняют длину пакета:

$$l_\text{пак} = \frac{l_1 - n_\text{к}\, b_\text{к}}{n_\text{к} + 1}. \qquad (7\text{-}9)$$

Суммарная длина пакетов сердечника

$$l_\text{ст1} = l_\text{пак}\,(n_\text{к} + 1). \qquad (7\text{-}10)$$

В некоторых случаях, главным образом для машин, имеющих большую длину, крайние пакеты делают более длинными, чем средние.

7-6. ОБМОТКА И ЗУБЦОВАЯ ЗОНА СТАТОРА

Для статоров синхронных машин находят применение петлевые обмотки, состоящие из многовитковых катушек, и волновые обмотки с числом эффективных проводников в пазу не более двух. Применение волновых обмоток имеет определенные преимущества при токах в параллельной ветви более 1000 А, поэтому они целесообразны для очень крупных машин (гидрогенераторы, турбогенераторы).

Для статоров синхронных машин общего назначения находят применение двухслойные катушечные петлевые обмотки с числом эффективных проводников в пазу $u_\text{п}$ более двух (см. гл. 4). По условиям технологии каждый эффективный проводник в зависимости от его сечения составляется из нескольких элементарных прямоугольных проводников с поперечным сечением 12—20 мм². Ток в таком составном проводнике допускается до 150—200 А. Если номинальный фазный ток машины $I_\text{н.ф}$ превышает указанные пределы, то обмотку выполняют из нескольких параллельных ветвей.

Номинальный фазный ток $I_\text{н.ф}$ обмотки статора при соединении ее в звезду равен линейному току $I_\text{н}$, а при соединении в треугольник будет в $\sqrt{3}$ раз меньше: $I_\text{н.ф} = I_\text{н}/\sqrt{3}$.

Номинальный линейный ток $I_\text{н}$ машины определяют исходя из заданных номинальных значений мощности и напряжения:

для генератора

$$I_\text{н} = \frac{S_\text{н}}{\sqrt{3}\, U_\text{н}} = \frac{P_\text{н}}{\sqrt{3}\, U_\text{н} \cos\varphi},$$

для двигателя

$$I_\text{н} = \frac{S_\text{н}}{\sqrt{3}\, U_\text{н}} = \frac{P_\text{н}}{\sqrt{3}\, U_\text{н} \eta \cos\varphi}. \qquad (7\text{-}11)$$

При выборе числа параллельных ветвей следует исходить из того, чтобы ток в параллельной ветви находился в пределах от 50 до 150 А или в крайнем случае до 200 А:

$$a = \frac{I_\text{н.ф}}{50 \div 150\,(200)}. \qquad (7\text{-}12)$$

В этом диапазоне намечают возможное число параллельных ветвей (a — целое число), имея в виду, что a должно быть кратно числу полюсов. В дальнейшем число параллельных ветвей необходимо увязать с выбранным числом пазов.

При выборе числа пазов следует учитывать ряд обстоятельств, влияющих на технико-экономические показатели проектируемой машины. При большом числе пазов увеличивается расход дорогостоящей пазовой изоляции, уменьшается механическая прочность зубцов, но улучшается форма кривых ЭДС и МДС обмотки статора. С другой

стороны, при уменьшении числа пазов возрастают объем тока в пазу и перепад температуры в изоляции, увеличиваются добавочные потери в меди, а также пульсационные и поверхностные потери. Кроме того, с увеличением размеров катушки усложняются ее изготовление и укладка в пазы. При разработке серии в целях унификации обмоточных проводов и числа применяемых

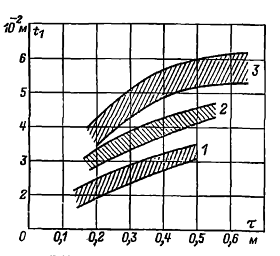


Рис. 7-13. Пределы изменения зубцового деления t_1 в зависимости от полюсного деления τ для синхронных машин.

1 — 13-го и 14-го габаритов; *2* — 16-го и 17-го габаритов; *3* — 18—21-го габаритов.

штампов стремятся выбирать одинаковые пазы для машин с различным числом полюсов.

Оптимальный выбор числа пазов Z_1 может быть сделан путем расчета и сопоставления между собой ряда вариантов. Задача упрощается, если воспользоваться опытом разработки подобных машин.

При этом можно исходить из зубцового деления

$$t_1 = \pi D/Z_1. \quad (7\text{-}13)$$

На рис. 7-13 показаны пределы изменения t_1 в зависимости от полюсного деления τ для выпускаемых в настоящее время машин общепромышленного применения мощностью свыше 100 кВт. Определив при данном значении τ максимальное и минимальное значения t_1, находят числа пазов (зубцов) машины:

$$Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{min}}; \quad Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{1max}}. \quad (7\text{-}14)$$

Из этого диапазона выбирают такие числа пазов (Z_1 — целое число), при которых выполняются следующие требования:

1. Z_1 должно быть кратным числу фаз m и числу параллельных ветвей a, т. е. Z_1/ma — целое число.

2. Число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1/2pm$ должно быть целым или дробным вида $q_1 = b + c/d$ (b — целое число, а c/d — правильная несократимая дробь), причем d не может быть кратно числу фаз m и должно быть меньше числа пар полюсов.

Для общепромышленных синхронных машин при $2p<8$ чаще всего выбирают целое число пазов на полюс и фазу $q=3(2)$—5 (большие значения для машин с меньшим числом полюсов). При числе полюсов $2p>8$ и малом полюсном делении можно выбирать обмотки с дробным $q\,(1^1/_2<q<3)$.

3. Число параллельных ветвей и число полюсов должны быть связаны следующими соотношениями:

а) при целом q_1 $2p/a$ — целое число;

б) при дробном q_1 $2p/ad$ — целое число.

4. Для удобства сегментировки статора желательно, чтобы число пазов разлагалось на возможно большее число простых множителей (2, 3, 5).

5. Число пазов должно быть кратным числу разъемов статора.

Четвертое требование следует выполнять для машин, имеющих внешний диаметр статора $D_a>$ >990 мм, а пятое — для машин с $D_a>3250$ мм. Из найденного выше диапазона чисел пазов выбирают такие Z_1, при которых наиболее полно удовлетворяются указанные требования. Затем определяют число эффективных проводников в пазу $u_п$ и зубцовое деление t_1:

$$u_п = \frac{\pi a D A}{Z_1 I_{н.ф}}; \quad (7\text{-}15)$$

$u_п$ округляют до ближайшего четного числа.

По найденному значению $u_п$ уточняют линейную нагрузку

$$A = \frac{Z_1 u_п I_{н.ф}}{\pi a D}. \quad (7\text{-}16)$$

Наилучшим вариантом числа пазов следует признать такой, при котором уточненное значение линейной нагрузки незначительно отличается от выбранной в начале расчета ($\pm 5\%$) и зубцовое деление имеет приемлемое значение. Полученные таким образом значения Z_1, $u_п$, a, q и A для машин с $D_a < 990$ мм являются окончательными и должны использоваться в дальнейших расчетах.

Для машин, имеющих $D_a > > 990$ мм, число пазов устанавливают после выбора сегментировки статора (см. § 7-7).

У синхронных машин мощностью менее 100 кВт при $U_н < 500$ В для статора чаще всего применяют полузакрытые пазы и всыпные петлевые обмотки из круглых проводников. Пазы имеют трапецеидальную или грушевидную форму. Число пазов на полюс и фазу q_1 берут целым и выбирают в пределах от 2 до 5. Большее значение q_1 берут для машин с меньшим число полюсов.

Задавшись числом q_1, определяют общее число зубцов статора:

$$Z_1 = 2pq_1 m. \qquad (7\text{-}17)$$

Тогда зубцовое деление статора

$$t_1 = \pi D / Z_1. \qquad (7\text{-}18)$$

Зубцовое деление для этих машин составляет 1,5—2,5 см. Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_п = t_1 Aa / I_{н.ф}. \qquad (7\text{-}19)$$

При двухслойной обмотке статора $u_п$ должно быть четным. При округлении $u_п$ следует контролировать изменение линейной нагрузки A. При значительном ее отклонении от ранее выбранной (более $\pm 5\%$) может потребоваться изменение t_1. При этом выбирают другое значение q_1 или число параллельных ветвей.

7-7. СЕГМЕНТИРОВКА СТАТОРА

Листы электротехнической стали выпускаются с максимальной шириной 1000 мм. Поэтому когда $D_a \geq 990$ мм, то магнитопровод статора собирается из отдельных сегментов (рис. 7-14).

Хорда сегмента (рис. 7-15) с необходимым припуском на штамповку (5—10 мм) должна быть возможно ближе к ширине одного из стандартных листов электротехнической стали, имеющих размеры 600×1500, 750×1500, 860×1720, 1000×2000 мм.

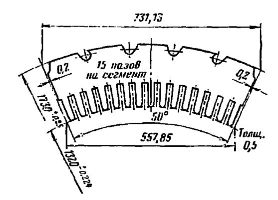


Рис. 7-14. Сегмент стали статора.

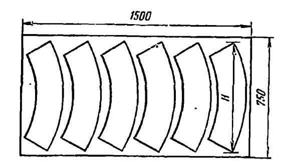


Рис. 7-15. Раскрой стандартного листа электротехнической стали.

Если принять, что число сегментов в полной окружности статора равно $s_{ст}$, то можно определить длину хорды H:

$$H = D_a \sin \frac{180^\circ}{s_{ст}}. \qquad (7\text{-}20)$$

Хорда также может быть выбрана равной примерно половине ширины листа, но не менее 370 мм. Число сегментов в слое может быть целым или дробным. Предпочтительным является целое число сегментов. Для большинства выпускаемых в настоящее время средних и крупных синхронных машин общего назначения число сегментов равно целому числу и выбрано в пределах от 6 до 18. Однако встречаются от-

Таблица 7-8

Номер варианта	Число пазов Z_1	Число сегментов $s_{ст}$	Хорда сегмента H	Число пазов в сегменте Z_s	Число пазов на полюс и фазу q_1	Число параллельных ветвей a	Число эффективных проводников в пазу $u_п$	Зубцовое (пазовое) деление t_1	Линейная нагрузка A
1									
2									

дельные машины, у которых $s_{ст}$ равно целому числу плюс $^1/_5$ или $^2/_5$ или $^1/_2$ или $^1/_3$. На рис. 7-14 показан сегмент с 15 пазами: его дуга соответствует 50°. Следовательно, здесь $s_{ст}=7^1/_5$ и в одном слое будет укладываться семь сегментов, а $^4/_5$ восьмого перейдет в следующий слой и т. д. Каждый сегмент должен иметь целое число пазовых делений, а стыки между соседними сегментами должны проходить через середину паза. Для того чтобы избежать накладывания краев сегментов друг на друга, между сегментами одного слоя предусматривается промежуток в 0,4—0,6 мм. Число пазов в сегменте берется от 8 до 20. При четном числе пазовых делений в сегменте каждый следующий их слой сдвигается на $^1/_2$ сегмента, а при нечетном числе — на $^1/_3$ сегмента, для чего число пазовых делений должно быть кратно трем. Если число сегментов в слое дробное, то число пазов в сегменте должно быть кратным знаменателю дроби.

Сегменты сердечника статора крепят к корпусу на двух, трех, а иногда и большем числе клиньев или шпилек. Для этого на внешней дуге сегмента предусматривают пазы соответствующей формы, расположенные обычно симметрично относительно середины сегмента. При круглых пазах крайние отверстия делают скошенными (рис. 7-14). Как правило, синхронные машины общего назначения имеют внешний диаметр меньше 3250 мм. Поэтому подразделение статора на части, вызванное возможностью его транспортировки по железной дороге, у них не производится.

При проектировании статора стремятся к подбору такого числа пазов статора Z_1, при котором на один сегмент приходилось бы соответствующее целое их число, а сегменты обеспечивали хороший раскрой листов стали. Задача эта может решаться двояко:

1. При данном Z_1 находят возможные варианты чисел сегментов и их хорд. Число сегментов должно быть кратно числу пазов и для их определения целесообразно использовать разложение Z_1 на множители.

2. Задаются рядом размеров хорды H и приближенно находят число сегментов

$$s_{ст}=\pi D/H.$$

Хорда H должна быть равна или быть несколько меньше следующих значений: 370, 420, 490, 590, 740, 850 мм. Затем, округляя $s_{ст}$ до целого или соответствующего дробного числа, добиваются, чтобы число зубцов Z_s в хорде было равно целому числу $Z_s=Z_1/s_{ст}$, после чего уточняют длину хорды H [по (7-20)]. Такие расчеты целесообразно проделать для нескольких выбранных ранее значений Z_1. Для удобства сопоставления результаты расчетов следует свести в таблицу (табл. 7-8).

В результате расчета определяют варианты, удовлетворяющие изложенным требованиям к сегментировке, из числа которых выбирают наиболее оптимальный.

Если ни при одном значении Z_1 удовлетворительной сегментировки не получается, то следует выбрать новые значения Z_1 за счет небольшого изменения пределов зубцового деления t_1 или за счет изменения диаметров и длины статора, а затем повторить расчет.

Число пазов Z_1, пазов на полюс и фазу q_1, параллельных ветвей a, эффективных проводников в пазу $u_п$, соответствующие окончательно выбранному варианту, можно принять для дальнейших расчетов.

7-8. ПАЗЫ, ОБМОТКА И ЯРМО СТАТОРА

а) Размеры пазов статора

После того как окончательно установлены число пазов статора и зубцовое деление t_1, приступают к определению размеров паза и проводников обмотки.

Опыт проектирования и теоретический анализ показывают, что с точки зрения наилучшего использования машины существует оптимум ширины паза $b_{п1}$ к зубцовому делению t_1. При прямоугольных пазах, которые применяют для машин мощностью выше 100 кВт, оптимальное отношение $b_{п1}/t_1$ в среднем составляет 0,42 [22], причем небольшие отклонения существенно не отражаются на показателях машины. Исходя из этого, можно предварительно определить ширину паза по соотношению

$$b_{п1} \approx (0{,}34 \div 0{,}50)\, t_1. \qquad (7\text{-}21)$$

Бо́льшие значения относятся к машинам меньших габаритов. Ширину паза берут тем больше, чем выше напряжение машины и чем толще изоляция. При узких пазах снижается коэффициент заполнения паза медью. С другой стороны, с увеличением ширины паза увеличиваются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников. Обычно ширина паза лежит в пределах 10—20 м. Окончательно ширину паза устанавливают после выбора проводников обмотки.

Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$q_{эф} = \frac{I_{нф}}{aJ_1}. \qquad (7\text{-}22)$$

Допустимая плотность тока J_1 определяется по произведению AJ_1, которое является характеристикой тепловой нагрузки обмотки и зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции. На рис. 7-16 дана зависимость $AJ_1 = f(\tau)$ для серийных синхронных машин с изоляцией класса B. При применении изоляции класса F значения AJ_1, приведенные на рис. 7-16, можно увеличить на 25—30%.

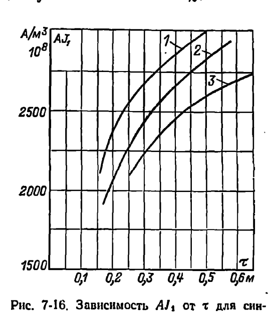


Рис. 7-16. Зависимость AJ_1 от τ для синхронных машин.

1 — 13-го и 14-го габаритов; 2 — 16-го и 17-го габаритов; 3 — 18-го—21-го габаритов.

Плотность тока

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A}. \qquad (7\text{-}23)$$

При определении размеров проводника можно исходить из следующих рекомендаций.

В целях уменьшения потерь от вихревых токов проводники в паз укладываются плашмя. Размеры проводника по высоте паза — толщину проводника a_1 — не следует брать больше 3—3,5 мм. Поперечное сечение проводника по возможности не должно превышать 18—20 мм². Если найденное сечение $q_{эф}$ больше 18—20 мм², то целесообразно его разбить на несколько элементарных $n_{эл}$ проводников.

Число элементарных проводников в одном эффективном в общем случае

$$n_{эл} = n_ш n_в, \qquad (7\text{-}24)$$

где $n_ш$ — число элементарных проводников по ширине паза (обычно один или два);

$n_в$ — число проводников, рас-

полагаемых по высоте паза (от 1 до 4).

Возможная ширина изолированных проводников

$$b'_{1из} = b_{п1} - \delta_{из.п}. \quad (7\text{-}25)$$

Двусторонняя толщина изоляции паза по его ширине $\delta_{из.п}$ зависит от конструкции изоляции и номинального напряжения машины. Примеры выполнения изоляции обмоток статора даны в гл. 3.

В синхронных машинах от 100 кВт и выше, выпускаемых промышленностью в настоящее время, применяется термореактивная или непрерывная изоляция класса нагревостойкости В, спецификация которой дана в табл. 3-2. Двусторонняя толщина этой изоляции составляет 6 мм при $U_н = 10\,000$ В, 4,7 мм при $U_н = 6000 \div 6600$ В и 2,2 мм при $U_н = 380 \div 400$ В.

По найденному значению $b'_{1из}$ и табл. П-29 подбирается стандартный элементарный проводник нужного сечения так, чтобы его ширина $b_{1из}$ (с изоляцией самого проводника) была равна:

$$b_{1из} \approx \frac{b'_{1из}}{n_ш} \leqslant 7{,}5 \text{ мм}. \quad (7\text{-}26)$$

Одновременно с шириной определяют и толщину стандартного проводника $a_{1из}$ (с изоляцией), а также его сечение $q_{эл} = a_1 \times b_1$. Двусторонняя толщина изоляции проводников различных марок дана в табл. П-30. Для синхронных машин при номинальном напряжении от 3000 до 6000 В для обмотки якоря применяют провода с эмале-волокнистой изоляцией марки ПЭТВСД, не требующие наложения дополнительной витковой изоляции. Двусторонняя толщина изоляции таких проводов равна 0,5 мм.

При номинальном напряжении 10 000 В для обмотки якоря применяют провода ПСД. В качестве витковой изоляции накладывают вполнахлеста один слой стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,09 мм. При напряжении менее 660 В применяют провода марок ПСД или ПЭТВП. После выбора проводников уточняют размеры паза:

ширина паза

$$b_{п1} = n_ш b_{1из} + \delta_{из.п} + \delta_{рш} + \delta_ш; \quad (7\text{-}27)$$

высота паза

$$h_{п1} = u_п n_в a_{1из} + \Sigma\delta_{из} + h_к + \delta_{р.в} + \delta_в, \quad (7\text{-}28)$$

где $h_к$ — высота клина, $h_к = 4 \div 5$ мм;

$\Sigma\delta_{из}$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза (определяется по табл. 3-2);

$\delta_{рш}$, $\delta_{р.в}$ — допуски на разбухание изоляции, $\delta_{рш} = 0{,}05 n_ш$; $\delta_{р.в} = 0{,}05 n_в u_п$; $\delta_ш$, $\delta_в$ — технологические допуски на укладку, $\delta_ш = \delta_в = 0{,}2$ мм.

Размеры паза «в свету» округляют до десятых долей миллиметра.

Обычно $h_{п1}/b_{п1} = 4 \div 6{,}5$ для машин с $U_н = 6000 \div 6600$ В и $3{,}5 \div 4{,}5$ для машин с $U_н = 380 \div 400$ В. Далее производят уточнение сечения эффективного проводника и плотности тока в нем. Сечение эффективного проводника $q_{эф}$ равно сумме сечений элементарных проводников:

$$q_{эф} = n_{эл} q_{эл}. \quad (7\text{-}29)$$

Фактическая плотность тока, А/м²,

$$J_1 = \frac{I_{н.ф}}{a q_{эф}}. \quad (7\text{-}30)$$

Окончательно размеры паза устанавливают после вычерчивания масштабного эскиза паза, составления его подробной спецификации и проверки максимальной индукции в зубце, индукции в спинке статора, а также перепада температуры в изоляции.

Максимальная индукция в зубце, Тл,

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta н} t_1 l_\delta}{(t_1 - b_{п1}) l_{ст1} k_c}. \quad (7\text{-}31)$$

Индукция B_{z1max} обычно лежит в пределах 1,6—2 Тл. Индукция в спинке статора, Тл,

$$B_a = \frac{\alpha_\delta B_{\delta н} \tau l_\delta}{2 h_a l_{ст1} k_c}, \quad (7\text{-}32)$$

где $h_a = (D_a - D)/2 - h_{п1}$ — высота спинки статора, м.

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ можно приближенно принять равным 0,65—0,68.

Индукция $B_п$ имеет значения 1,2—1,45 Тл.

Коэффициент заполнения пакста сталью k_c берется из табл. 2-1.

Статоры синхронных машин при частоте 50 Гц чаще всего выполняют из лакированных листов толщиной 0,5 мм (k_c=0,93).

Перепад температуры в изоляции паза

$$\Delta\vartheta_{из,п} = \frac{J_1 A k_ф}{4,2 \cdot 10^{11}} \frac{t_1}{2(b_п + h_п - h_к)} \times \frac{0,5\delta_{из,п}}{\lambda_{из}}, \qquad (7\text{-}33)$$

где $k_ф$ — коэффициент добавочных потерь, $k_ф$=1,03÷1,1;

$\lambda_{из}$ — теплопроводность изоляции, $\lambda_{из}=1 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·°С) для некомпаундированной изоляции, $\lambda_{из}=1,6 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·°С) для компаундированной изоляции, $\lambda_{из}=2,2 \cdot 10^{-5}$ Вт/(м·°С) для изоляции, выполненной по способу «монолит».

Для изоляции класса нагревостойкости В перепад температуры $\Delta\vartheta_{из,п}$ не должен превышать 30—35° С.

В (7-31)—(7-33) линейные размеры подставляются в метрах, J — в А/м², A — в А/м, B — в теслах.

Если индукции или $\Delta\vartheta_{из,п}$ превышают рекомендуемые пределы, то следует скорректировать размеры паза и проводов.

Как было сказано выше, для машин низкого напряжения мощностью до 100 кВт (5—9-й габариты) в основном применяют полузакрытые пазы со всыпной обмоткой. Изоляция таких пазов дана в табл. 3-8. В синхронных машинах, выпускаемых в настоящее время промышленностью, для обмоток статора применяют изоляцию класса «монолит». Обмотку выполняют из круглых проводников. Марку проводников выбирают в зависимости от принятой нагревостойкости изоляции. При нагревостойкости изоляции класса В рекомендуется применять провода марок ПЭТВ, ПЭТВМ или ПСД, а при классе F — провода ПЭТ-155, ПЭТМ, ПСД, ПСДКТ. Возможно также применение проводников и других марок (см. гл. 2). При выполнении обмотки из круглых проводников не следует их диаметр выбирать более 2 мм. При больших сечениях эффективного проводника его целесообразно разбить на несколько элементарных $n_{эл}$, а иногда выполнить обмотку в несколько a параллельных ветвей.

Сечение элементарного проводника $q_{эл}$, м²,

$$q_{эл} = I_{нф}/n_{эл} a J_1. \qquad (7\text{-}34)$$

Подбором $n_{эл}$ и a добиваются, чтобы $q_{эл}<3,1 \cdot 10^{-6}$ м² ($d_{эл}<2 \times 10^{3}$ м). Плотность тока при изоляции класса В выбирают в пределах (6,9—7,5)·10⁶ А/м² для машин с $n_н$=1500 об/мин и (5,9—6,5)×10 А/м² для машин с $n_н$=1000 об/мин. Нижние пределы соответствуют более мощным машинам. По найденному сечению из табл. П-28 подбирают размеры стандартного провода, после чего определяют сечение эффективного проводника $q_{эф}=n_{эл}q_{эл}$ и уточняют плотность тока.

Необходимую площадь паза $S'_п$ для размещения изолированных проводников находят, задавшись коэффициентом заполнения $k_з$:

$$S'_п = \frac{u_п n_{эл} d^2_{эл,из}}{k_з}, \qquad (7\text{-}35)$$

где $d_{эл,из}$ — диаметр элементарного изолированного проводника;

$S'_п$ — сечение паза без учета пазовой изоляции, площади клина и междукатушечной прокладки;

$k_з$ — коэффициент заполнения, $k_з$=0,68÷0,74; меньшие значения рекомендуется выбирать для относительно длинных машин с большим числом проводников в пазу $u_п$.

Размеры паза устанавливают после вычерчивания в масштабе одного зубцового деления (рис. 7-17). Сначала на чертеже наносят зубцы. Зубец, кроме верхней своей части, имеет одинаковую ширину b_z, которую можно определить, исходя из допустимого значения индукции

B_{z1max} в нем:

$$b_z = \frac{B_{\delta н} t_1 l_\delta}{B_{z1max} l_{ст1} k_c}, \quad (7\text{-}36)$$

B_{z1} выбирают в пределах 1,55—1,85 Тл; высота клина 2,5—3 мм.

Пространство, ограниченное зубцами и клином, за вычетом изоляции представляет часть паза, в котором размещаются проводники обмотки. Высоту этой части подбирают, исходя из того, чтобы площадь

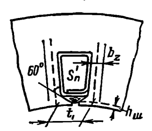


Рис. 7-17. К определению размеров полузакрытого паза при всыпной обмотке.

образовавшейся фигуры (на рис. 7-17 — трапеции) была равна $S'_п$. Для свободного проталкивания проводника при укладке обмотки ширину щели полузакрытых пазов выбирают на 1,5—2 мм больше диаметра изолированного проводника. Высота шлица $h_ш$=0,7÷1 мм. После того как будут установлены размеры паза, следует по (7-32) проверить индукцию в спинке статора.

б) Обмотка статора

Эффективные витки в фазе обмотки статора

$$w_1 = 2pq_1 \frac{u_п}{2} \frac{1}{a}. \quad (7\text{-}37)$$

Двухслойные обмотки статора, как правило, выполняют с укороченным шагом. Шаг обмотки обычно выбирают в пределах

$$y_1 = (0{,}8 \div 0{,}86)\tau_п, \quad (7\text{-}38)$$

где $\tau_п = 3q_1$; y_1 округляют до целого числа; $y/\tau_п = \beta < 1$.

Коэффициент укорочения

$$k_у = \sin\frac{\pi\beta}{2}. \quad (7\text{-}39)$$

Коэффициент распределения

$$k_р = \frac{0{,}5}{q_1 \sin\frac{30°}{q_1}}. \quad (7\text{-}40)$$

При дробном числе пазов на полюс и фазу в (7-40) вместо q_1 подставляют $(bd+c)$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{об} = k_у k_р. \quad (7\text{-}41)$$

7-9. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР И ПОЛЮСЫ РОТОРА

Воздушный зазор в основном определяет технико-экономические показатели машин. При увеличении зазора возрастают размеры полюсов, обмотки возбуждения и потери в этой обмотке. С другой стороны, при малых зазорах повышаются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников, а также появляется опасность при деформации ротора задевания его о статор. От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки синхронной машины по моменту и мощности. Как известно, на максимальные значения момента M_m и электромагнитной мощности $P_{эm}$ существенное влияние оказывает синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d. Чем больше зазор, тем меньше индуктивное сопротивление x_d и, следовательно, бóльшими будут кратности максимальных значений момента $M_m/M_н$ и мощности $P_{эm}/P_н$. В синхронных машинах общепромышленного назначения при выборе воздушного зазора обычно исходят из значения x_d, при котором $M_m/M_н$ или $P_{эm}/P_н$ будут иметь необходимые значения. Связь между x_d и зазором δ устанавливается из известного соотношения

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad}}{k_{\mu0}} \frac{F_{ан}}{F_{\delta0}} = \frac{k_{ad} 0{,}45m I_{н.ф} \frac{w_1 k_{об1}}{p}}{k_{\mu0} \frac{B_{\delta0}}{\mu_0} \delta k_\delta}. \quad (7\text{-}42)$$

Учитывая, что $\frac{2m w_1 I_{н.ф}}{2p\tau} = A$, после преобразований получаем:

$$x_{ad*} = \frac{0{,}45 k_{ad} k_{об1} A\tau}{k_{\mu0} \frac{B_{\delta0}}{\mu_0} \delta k_\delta}, \quad (7\text{-}43)$$

где $x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma*}$ — индуктивное

сопротивление продольной реакции якоря;

$x_{\sigma*}$, x_{d*} — индуктивные сопротивления рассеяния и синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси;

k_δ — коэффициент воздушного зазора;

k_{ad} — коэффициент продольной реакции якоря по рис. 7-23;

$k_{\mu0}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стальных участков магнитной цепи и стыков между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины;

$B_{\delta0} \approx 0{,}95 B_{\delta н}$ — максимальная индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении, Тл;

$\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6}$ Г/м — магнитная постоянная.

Если принять в среднем $k_{об1} = 0{,}92$, $k_{ad} = 0{,}82$, $k_\delta = 1{,}3$, $x_{ad} = 0{,}92 x_d$ и $k_{\mu0} = 1{,}07 \div 1{,}3$, то получим:

$$\delta \approx (0{,}27 \div 0{,}33) \cdot 10^{-6} \frac{A}{B_{\delta0}} \frac{\tau}{x_{d*}}. \quad (7\text{-}44)$$

В (7-44) подставляют A в А/м, B — в теслах, τ — в метрах, тогда δ получаем в метрах. Коэффициент в скобках выбирают тем меньше, чем большее значение имеет x_{d*}. Нижний его предел соответствует $x_{d*} \geqslant 1{,}9$. На рис. 7-18 дана зависимость $x_{d*} = f(M_m/M_н)$, полученная на основании осреднения расчетных данных явнополюсных синхронных машин общего назначения. По этой зависимости, исходя из заданного значения $M_m/M_н = P_{эm}/P_н$, можно предварительно найти x_{d*} и подставить в (7-44). Для синхронных двигателей согласно ГОСТ 183-74 $M_m/M_н \geqslant 1{,}65$. Такое же значение можно принимать для кратности максимальной мощности у генераторов. Обычно отношение $M_m/M_н$ лежит в пределах 1,65—2,5.

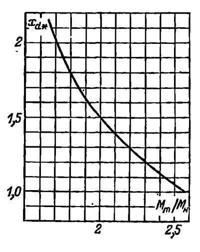


Рис. 7-18. Зависимость x_{d*} от $M_m/M_н$.

В современных синхронных машинах воздушный зазор по ширине полюсного наконечника делают не одинаковым. Чтобы получить распределение магнитного поля, приближающегося к синусоидальному, зазор под краями полюсов берут примерно в 1,5 раза больше, чем в середине, т. е. $\delta_m/\delta \approx 1{,}5$, где δ — зазор под серединой полюса. С этой целью радиус дуги полюсного наконечника выбирают меньше внутреннего радиуса статора (рис. 7-19):

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D \dfrac{\delta_m - \delta}{b_p^2}}. \quad (7\text{-}45)$$

Среднее значение зазора принимают равным:

$$\delta' = \delta + \frac{1}{3}(\delta_m - \delta). \quad (7\text{-}46)$$

Равномерный воздушный зазор по всей ширине полюсного наконечника в настоящее время применяют иногда в машинах небольшой мощности.

Длина полюсной дуги

$$b_p = \alpha\tau, \quad (7\text{-}47)$$

где α — коэффициент полюсного перекрытия (конструктивный).

При $2p \geqslant 8$ хорда, соединяющая края полюсного наконечника, практически не отличается от дуги.

От α зависит использование активного объема машины. С увеличением α при прочих равных условиях уменьшается объем активной части машины, но возрастает поток рассеяния полюсов. Обычно α выбирают в пределах 0,68—0,73.

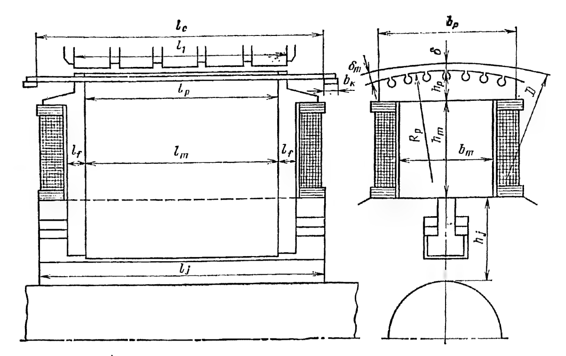


Рис. 7-19. Размеры ротора синхронной явнополюсной машины.

Полюсы чаще всего выполняют шихтованными. В крупных машинах для полюсов используют сталь Ст3 толщиной 1 или 1,4 мм. Запрессовку сердечников полюсов осуществляют с помощью нажимных щек и шпилек.

Полюсы в быстроходных машинах при $v_p \approx \pi D n/60 < 30$ м/с прикрепляют с помощью хвостов к шихтованному остову (см. рис. 7-3 и 7-19), а в тихоходных машинах приворачивают шпильками к ободу магнитного колеса (см. рис. 7-2). Шихтованный обод и магнитное колесо изготавливают из стали Ст3.

У машин мощностью меньше 100 кВт полюсы собирают из листов электротехнической стали и прикрепляют проходящими через них болтами к напрессованной на вал втулке или непосредственно к валу. Применяют конструкцию ротора, показанную на рис. 7-7. Более подробно о креплении полюсов изложено в § 9-5.

Высоту полюсного наконечника h_p (см. рис. 7-19) выбирают, исходя из того, чтобы была возможность разместить на его краях стержни демпферной (пусковой) клетки, а также из условий достаточной механической прочности. Ниже приводятся значения h_p в зависимости от полюсного деления машины (табл. 7-9).

Длины полюсного наконечника l_p и полюса l_m по оси машины принимают равными длине статора l_1 (или на 1—2 см меньше).

Высота полюсного сердечника h_m, м, предварительно может быть найдена по одной из следующих формул:

$h_m \approx 0{,}016 + 0{,}186\sqrt[4]{\tau}$ — для машин 16—20-го габаритов;

$h_m \approx 10{,}5\delta + 0{,}08$ — для машин 10—15-го габаритов при $2p > 6$;

$h_m \approx (0{,}45 \div 0{,}55)\, b_p$ — для машин 10—15-го габаритов при $2p \leqslant 6$;

$h_m \approx (0{,}3 \div 0{,}35)\, D - (h_p + \delta)$ — для машин небольшой мощности (до 100 кВт). (7-48)

В (7-48) τ, δ, b_p, h_p и D подставляют в метрах.

Окончательно высоту h_m устанавливают после расчета и укладки обмотки возбуждения.

Ширину полюсного сердечника b_m определяют, исходя из допусти-

Таблица 7-9

τ, см	15—20	20—30	30—40	40—50	50—60	Примечание
$h_р$, см	2,2—3	3—4	4—5	5—6	6—7,5	При наличии демпферной клетки
$h_р$, см	1,6—2,2	2,2—3	3—3,7	3,7—4,5	4,5—5,5	При отсутствии демпферной клетки

мого значения индукции B_m в основании полюса. При определении индукции B_m необходимо учитывать поток рассеяния полюса Φ_σ. Этот поток наряду с основным потоком Φ проходит по сердечнику полюса. Таким образом, поток полюса

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi\left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi}\right) = \Phi\sigma_m, \quad (7\text{-}49)$$

где σ_m — коэффициент рассеяния.

Поток и коэффициент рассеяния зависят от размеров полюса, которые пока не известны. Предварительно коэффициент рассеяния можно определить

$$\sigma_m \approx 1 + k\frac{0{,}35\delta}{\tau^2}, \quad (7\text{-}50)$$

где δ и τ в метрах; k — коэффициент, зависящий от высоты полюсного наконечника $h_р$.

При выборе коэффициента k можно руководствоваться следующей таблицей:

$h_р$, см . . .	3	4	5	6	7
k	7	8,5	10	11	12

Тогда ширину полюсного сердечника находят по следующей формуле:

$$b_m = \frac{\alpha_\delta B_{\delta н} \tau l_\delta}{B_m k_{c,р} l'_m}\sigma_m. \quad (7\text{-}51)$$

Коэффициент заполнения полюса сталью $k_{c,р}$ принимают при толщине листов 1 мм — 0,95, при толщине листов 1,5 мм — 0,97. Индукцию B_m выбирают в пределах 1,4—1,6 Тл.

Расчетная длина сердечника полюса, м,

$$l'_m = l_m + l_f, \quad (7\text{-}52)$$

где l_f — толщина одной нажимной щеки полюса, м; $l_f = (1{,}5—3)\cdot 10^{-2}$ м.

Берется l_f, а не $2l_f$, чтобы приближенно учесть ослабление сечения щек за счет закругления краев и отверстий для гаек стяжных шпилек.

Размеры остова или обода магнитного колеса l_j в большинстве случаев определяются конструктивными соображениями и требованиями механической прочности и получаются больше, чем это необходимо для проведения магнитного потока. Ввиду этого при электромагнитном расчете определяют длину остова или обода l_j и их минимально возможную толщину h_j. В дальнейшем при размещении обмотки возбуждения на полюсе и при разработке конструкции толщина остова или обода, а также их внешние диаметры и размеры самого полюса должны быть уточнены:

$$l_j = l_m + \Delta l_c, \quad (7\text{-}53)$$

для крупных машин $\Delta l_c = (10 \div 15) \times \times 10^{-2}$ м, для средних $\Delta l_c = (4 \div 5) \times \times 10^{-2}$ м и для малых $\Delta l_c = 0$;

$$h_j = \frac{\alpha_\delta B_{\delta н} \tau l_\delta}{2B_j l_j}\sigma_m. \quad (7\text{-}54)$$

Индукция B_j выбирается в пределах 1—1,3 Тл.

7-10. РАСЧЕТ ДЕМПФЕРНОЙ (ПУСКОВОЙ) ОБМОТКИ

Демпферную (пусковую) обмотку размещают в пазах полюсных наконечников ротора (рис. 7-20, *а*). Эта обмотка в генераторах служит для ослабления обратного синхронного поля при несимметричной нагрузке, успокоения качаний ротора, предотвращения динамических перенапряжений при несимметричных коротких замыканиях и повышения электродинамической стойкости. В двигателях эта обмотка необходи-

ма для асинхронного пуска и успокоения качаний ротора.

Расчет демпферной обмотки заключается в определении количества и размеров стержней обмотки, а также размеров короткозамыкающих сегментов. Короткозамыкающие сегменты замыкают все стержни с торцов полюса и соединяются

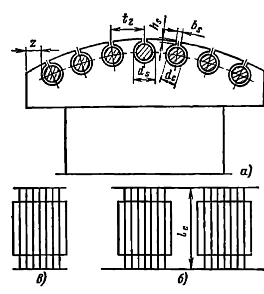


Рис. 7-20. Демпферная (пусковая) обмотка.

а — расположение обмотки на полюсе; б — продольно-поперечная обмотка; в — продольная обмотка.

с сегментами соседних полюсов, образуя кольцо (рис. 7-20, б). В этом случае демпферная обмотка носит название продольно-поперечной. Если сегменты соседних полюсов не соединяются между собой (рис. 7-20, в), то обмотка называется продольной. Наиболее часто применяют продольно-поперечные демпферные обмотки.

Для машин общего назначения число стержней N_c на полюсе выбирают обычно в пределах от 5 до 10. Стержни выполняют из меди или латуни круглого сечения. Чаще всего демпферную (пусковую) обмотку выполняют из медных стержней. Стержни из латуни применяют в тех случаях, когда необходимо получить большие значения начального пускового момента у синхронных двигателей. Иногда для повышения пускового момента обмотку изготовляют из разнородных материалов — крайние стержни клетки делают из латуни, а остальные — из меди. Поперечное сечение всех стержней, расположенных на полюсе, принимают равным 0,15—0,35 от сечения меди обмотки статора, приходящейся на полюс. Исходя из этого сечение стержня

$$q_c = \frac{(0,15 \div 0,35)\,\tau A}{N_c J_1}. \qquad (7\text{-}55)$$

Коэффициент в скобках (7-55) для генераторов принимается 0,15—0,25, для двигателей 0,25—0,35.

Диаметр стержня

$$d_c = 1,13\sqrt{q_c} \qquad (7\text{-}56)$$

округляют до размера, кратного 0,5 мм.

Зубцовый шаг на роторе

$$t_2 = \frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1}, \qquad (7\text{-}57)$$

где z — расстояние между крайним стержнем и краем полюсного наконечника: $z \geqslant (0,3 \div 0,7) \cdot 10^{-2}$ м.

Помимо выполнения основной своей задачи демпферная обмотка снижает амплитуды гармоник магнитного поля, обусловленных зубчатостью статора. Эти гармоники вызывают пульсацию ЭДС в обмотке статора и образуют токи и добавочные потери в самой демпферной обмотке.

Для того чтобы демпферная обмотка наилучшим образом выполняла свои задачи, при ее проектировании следует соблюдать следующие требования.

В генераторах для уменьшения добавочных потерь и искажения кривых ЭДС желательно иметь зубцовый шаг на роторе t_2 возможно более близким к зубцовому шагу статора t_1. Если число пазов на полюс и фазу в статоре q_1 целое число, или $q_1 = b + c/d = b + 1/2$, или $(bd + c) \leqslant 9$, то $0,8t_1 < t_2 < t_1$.

Для исключения из кривой ЭДС высших гармонических, обусловленных зубчатостью статора, нобходимо иметь:

$$t_2 = \frac{k}{N_c - 1}\,\frac{6q_1}{6q_1 + 1}\,t_1; \qquad (7\text{-}58)$$

$$\frac{2\tau}{t_2} - (6q_1 \pm 1) \geqslant 3, \qquad (7\text{-}59)$$

где N_c — число стержней в полюсе;
k — целое число, близкое к $N_c - 1$.

При достаточно высокой дробности зубцовые гармонические в кривой ЭДС не проявляются, поэтому при $(bd+c) > 9$ можно принимать $t_2 = t_1$.

В двигателях для уменьшения добавочных потерь и исключения «прилипания» ротора число стержней N_c и их шаг t_2 выбирают так, чтобы

$$\left.\begin{aligned} & t_2 \geqslant 0{,}8t_1; \\ & (N_c - 1)\left(1 - \frac{t_2}{t_1}\right) > 0{,}75. \end{aligned}\right\} \quad (7\text{-}60)$$

Исходя из этого необходимо найденное в (7-57) значение зубцового шага проверить на соответствие указанным требованиям и в случае их невыполнения сделать пересчет, задавшись другими значениями N_c или z.

Пазы на роторе выбирают круглые, полузакрытые. Диаметр паза d_s, мм, равен $d_c + 0{,}1 \div 0{,}2$. Ширина шлица паза $b_s = 3 \div 4$ мм, высота $h_s = 2 \div 3$ мм. В дальнейшем при расчете параметров и пусковых характеристик раскрытие паза может быть уточнено.

Длина стержня l_c предварительно может быть принята, м,

$$l_c = l_p + (0{,}2 \div 0{,}4)\tau. \quad (7\text{-}61)$$

Окончательно длину стержня устанавливают при разработке конструкции.

Сечение короткозамыкающего сегмента выбирают примерно равным половине полного сечения стержней одного полюса:

$$q_{к,з} = b_{к,з} h_{к,з} = (0{,}85 \div 1{,}15) \cdot 0{,}5 N_c q_c.$$

По найденному сечению выбирают стандартную полосовую медь (табл. П-32) толщиной $b_{к,з}$ не менее $^2/_3 d_c$.

7-11. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят с целью определения МДС обмотки возбуждения $F_{в0}$, необходимой для создания магнитного потока машины Ф при холостом ходе.

При вращении ротора этот поток наводит в обмотке статора ЭДС. Таким образом, в результате расчета магнитной цепи может быть построена зависимость $E = f(F_{в0})$, которая носит название характеристики холостого хода.

При расчете магнитной цепи задаются фазной ЭДС E в обмотке статора и по известному выражению определяют полезный поток, Вб,

$$\Phi = \frac{E}{4k_B f w_1 k_{об1}}, \quad (7\text{-}62)$$

где w_1 и $k_{об1}$ — число витков и обмоточный коэффициент фазы статора;
f — частота, Гц;
k_B — коэффициент формы поля, представляющий собой отношение действующего значения индукции к ее среднему значению.

При синусоидальном распределении магнитного потока в зазоре машины коэффициент формы поля $k_B = 1{,}11$. Однако в синхронных машинах магнитное поле имеет несинусоидальную форму. Характер распределения этого поля зависит от ширины и конфигурации полюсного наконечника, а также от относительной длины воздушного зазора δ/τ. Для определения коэффициента формы поля k_B в этом случае можно воспользоваться кривыми рис. 7-21.

По найденному потоку определяют максимальное значение индукции в воздушном зазоре машины, Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta}, \quad (7\text{-}63)$$

где α_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отношению расчетной длины полюсной дуги b_δ к полюсному делению τ. Этот коэффициент определяют по рис. 7-21 в зависимости от α и δ/τ;
τ, l_δ — полюсное деление и расчетная длина, м.

Расчетную длину магнитопровода (уточненное значение) определя-

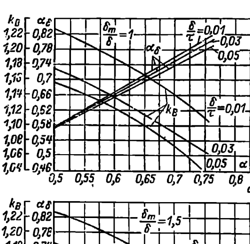
ют по формуле

$$l_\delta = l_1 - b'_к n_к + 2\delta', \qquad (7\text{-}64)$$

где

$$b'_к = \gamma\delta; \quad \gamma = \left(\frac{b_к}{\delta}\right)^2 \Big/ 5 + \frac{b_к}{\delta}.$$

Магнитодвижущую силу обмотки возбуждения определяют как сумму магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи машины.



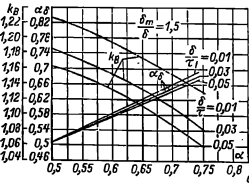


Рис. 7-21. $\alpha_\delta = f(\alpha)$ и $k_B = f(\alpha)$ для синхронных машин.

а — при $\delta_m/\delta = 1$; *б* — $\delta_m/\delta = 1,5$.

1. Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta, \qquad (7\text{-}65)$$

где B_δ — в теслах, δ — в метрах и $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Коэффициент воздушного зазора k_δ учитывает зубчатое строение статора и ротора. Из-за наличия зубцов и пазов происходит перераспределение потока в зазоре, в результате чего индукция, а следовательно, и магнитное напряжение зазора над коронками зубцов возрастают. Этот коэффициент равен произведению коэффициентов воздушного зазора для статора $k_{\delta 1}$ и ротора $k_{2\delta}$:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \qquad (7\text{-}66)$$

Коэффициенты $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ определяют по эмпирическим формулам

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta'}{t_1 - b_{п1} + 10\delta'};$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10\delta'}{t_2 - b_s + 10\delta'}, \qquad (7\text{-}67)$$

где t_1 и t_2 — зубцовые шаги статора и ротора;

$b_{п1}$ и b_s — ширина паза статора и прорези паза ротора; при полузакрытых пазах на статоре $b_{п1}$ — ширина прорези паза.

2. Магнитное напряжение зубцов статора, А,

$$F_{z1} = H_{z1} h_{п1}. \qquad (7\text{-}68)$$

Для упрощения расчета магнитного напряжения зубцов, имеющих трапециевидную форму, напряженность магнитного поля H_{z1} находят по значению индукции B_{z1} для одного сечения, расположенного от коронки на $^1/_3$ высоты паза $h_{п1}$:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{b_{z1^1/_3} l_{ст1} k_c}. \qquad (7\text{-}69)$$

Ширина зубца на высоте $^1/_3$ $h_{п1}$ от его коронки

$$b_{z1^1/_3} = t_{z1^1/_3} - b_{п1}, \qquad (7\text{-}70)$$

где

$$t_{z1^1/_3} \frac{\pi (D + 2h_{п1}/3)}{Z_1}.$$

Высота паза $h_{п1}$ и другие линейные размеры в формулы (7-68) и (7-70) подставляются в метрах, B_δ — в теслах и H_{z1} — в А/м.

Для машин небольшой мощности, имеющих полузакрытые пазы, зубец по большей части своей высоты имеет прямоугольную форму и в этом случае B_{z1} и H_{z1} определяют для сечения, расположенного на $^1/_2$ высоты $h_{п1}$.

При нахождении H_{z1}, соответствующего полученному значению индукции, используют кривые намагничивания стали, из которой выполнена магнитная система статора. У выпускаемых в настоящее время синхронных машин магнитопроводы статора выполняют из горячекатаных сталей марок 1211 для машин

мощностью до 100 кВт и 1511, 1512, 1413 для более мощных машин.

При разработке новых машин возможно также применение изотропных холоднокатаных сталей, имеющих лучшие магнитные характеристики по сравнению с горячекатаными. Для машин относительно небольшой мощности целесообразно применение сталей марки 2013 или 2312, и для более мощных машин — стали 2411.

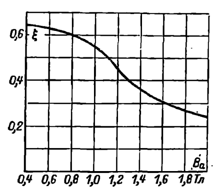


Рис. 7-22. Зависимость коэффициента ξ от индукции в ярме.

При значениях $B_{z1} \leqslant 1{,}8$ Тл для горячекатаной стали и $B_{z1} \leqslant 1{,}9$ Тл для холоднокатаной стали H_{z1} для выбранной марки стали определяют по основным кривым намагничивания (см. приложение II). При больших значениях индукции необходимо учитывать, что из-за насыщения зубцов часть потока будет ответвляться в пазы и вентиляционные каналы. Напряженность H_{z1} в этом случае для выбранной марки стали определяют по индукции B_{z1} по одной из кривых рис. П-6—П-13, построенных для различных отношений площади воздушных частей к площади зубцов в данном сечении:

$$k_{п^1/_3} = \frac{t_{z1^1/_3}\, l_1}{b_{z1^1/_3}\, l_{ст1}\, k_c} - 1. \quad (7\text{-}71)$$

3. Магнитное напряжение для спинки статора

$$F_a = \xi L_a H_a, \quad (7\text{-}72)$$

где L_a — длина магнитной линии в спинке статора, м,

$$L_a = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4p}; \quad (7\text{-}73)$$

ξ — коэффициент, выбираемый по рис. 7-22 и учитывающий неравномерное распределение индукции по поперечному сечению спинки статора;

H_a — напряженность магнитного поля в спинке статора, А/м.

Напряженность H_a определяют в соответствии с индукцией B_c по той же кривой намагничивания, что и для зубцов статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 l_{ст1} h_a k_c}. \quad (7\text{-}74)$$

4. Магнитное напряжение зубцов ротора, А,

$$F_{z2} = H_{z2} h_{z2}. \quad (7\text{-}75)$$

Высота зубца ротора, м (рис. 7-20),

$$h_{z2} = h_s + d_s. \quad (7\text{-}76)$$

Напряженность магнитного поля зубцов определяют из кривой намагничивания стали ротора по индукции в зубце B_{z2}. Для роторов крупных синхронных машин для полюсов применяют сталь Ст3. У машины небольшой мощности полюсы изготовляют из стали 1211. Соответствующие кривые намагничивания даны в приложении II. Индукцию B_{z2}, Тл, и соответствующую ей напряженность магнитного поля H_{z2} определяют для одного сечения зубца ротора, расположенного от коронки зубца на расстоянии $^1/_3\ h_{z2}$:

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2^1/_3} l_р k_{с.р}}, \quad (7\text{-}77)$$

где ширина зубца, м,

$$b_{z2^1/_3} = \frac{D - 2\delta - {^2/_3} h_{z2}}{D - 2\delta} t_2 - 0{,}94 d_s. \quad (7\text{-}78)$$

При $B_{z2} > 1{,}8$ Тл необходимо учитывать потоки, вытесняемые в паз, так же как это было показано для зубцов статора.

5. Магнитное напряжение полюса, А,

$$F_m = h_{mp} H_m, \quad (7\text{-}79)$$

где $h_{mp} = h_m + h_p$ — расчетная длина силовой линии в полюсе, м;

H_m — напряженность поля у основания полюса, А/м.

Напряженность поля H_m определяют из кривой намагничивания по индукции в основании полюса B_m.

При определении индукции B_m следует, исходя из найденных размеров полюса (рис. 7-19), произвести уточнение потока рассеяния Φ_σ. Поток рассеяния Φ_σ можно подразделить на три составляющие: 1) поток рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов; 2) поток рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников; 3) поток рассеяния между торцевыми поверхностями полюсов. В соответствии с этим Φ_σ, Вб, можно найти по следующему выражению:

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{m\sigma} l'_m (F_\delta + F_{z1} + F_a + F_{z2}), \quad (7\text{-}80)$$

где l'_m — расчетная длина сердечника полюса, м;

$\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb}$ — удельная магнитная проводимость для потока рассеяния на одну сторону полюса.

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов

$$\lambda_{ml} = \frac{0{,}55 h_m}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)} \cdot 10^{-6}. \quad (7\text{-}81)$$

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников

$$\lambda_{pl} = \left[1{,}4\left(\frac{d_t}{a'_p} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{c_p}{a'_p} + 0{,}2\right) - 0{,}4\left(\frac{c_p}{a'_p} - 0{,}5\right)^2\right] \cdot 10^{-6}. \quad (7\text{-}82)$$

Удельная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями

$$\lambda_{mb} = 0{,}37\frac{b_m}{l'_m} \cdot 10^{-6}. \quad (7\text{-}83)$$

Здесь принято $c_p = (b_p - b_m)/2$; $a'_p = \tau - b_p - \pi d_t/p$, $d_t = h_p + \delta - b_p^2/4D$, при $d_t/a'_p < 0{,}25$ первым членом в (7-82) пренебрегают.

Индукция B_m, Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l'_m b_m k_{c,p}}. \quad (7\text{-}84)$$

Если индукция B_m в основании полюса превышает 1,6 Тл, то следует проводить уточненный расчет, учитывающий изменение потока по высоте полюса. Для этого определяют потоки в трех сечениях полюса: у его основания $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, у полюсного наконечника $\Phi'_m = \Phi + \Phi_\sigma \frac{\lambda_{pl}}{\lambda_{m\sigma}}$ и в среднем сечении $\Phi_{mср} = (\Phi_m + \Phi'_m)/2$. Деля эти потоки на площадь поперечного сечения полюса, определяют индукции, а затем и магнитные напряженности H_m, H'_m, $H_{mср}$.

Расчетное значение напряженности полюса определяют по приближенной формуле

$$H_{mp} = \frac{1}{6}(H_m + H'_m + 4H_{mср}). \quad (7\text{-}85)$$

6. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора определяют по индукции в основании полюса B_m, А:

$$F_{\delta mj} = 250 B_m. \quad (7\text{-}86)$$

7. Магнитное напряжение в остове или ободе ротора, А,

$$F_j = L_j H_j, \quad (7\text{-}87)$$

где $L_j = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p}$ — длина магнитной линии в остове, м;

H_j — напряженность магнитного поля, А/м, определяемая по кривой намагничивания, исходя из индукции B_j.

Индукция в остове или ободе магнитного колеса, Тл, с некоторым приближением может быть определена как

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2l_j h_j k_{c,p}}. \quad (7\text{-}88)$$

При нешихтованном ободе $k_{c,p} = 1$.

Обычно в средних и крупных машинах магнитное напряжение F_j относительно мало и при расчете магнитной цепи не учитывается.

Просуммировав магнитные напряжения всех участков магнитной цепи, определяют МДС обмотки возбуждения на один полюс при холо-

стом ходе:

$$F_{в0} = F_\delta + F_{z1} + F_a + F_{z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j. \quad (7\text{-}89)$$

Проделав подобный расчет для ряда значений ЭДС, получают характеристику холостого хода $E=f(F_{в0})$. Для расчетов можно задаваться следующими значениями ЭДС: 0,5; 1,1; 1,2 и $1{,}3U_{н,ф}$. Полученные результаты сводят в таблицу (см. пример расчета в § 7-20). Характеристику холостого хода целесообразно выразить в относительных единицах и сравнить ее с нормальной характеристикой. При переводе в относительные единицы значение ЭДС в вольтах делят на номинальное фазное напряжение. Для МДС обмотки возбуждения за базовое значение принимают МДС, соответствующую номинальному фазному напряжению $U_{н,ф}$, и к ней относят остальные значения МДС.

За нормальную характеристику холостого хода для явнополюсных синхронных машин принимают характеристику со следующими данными (в относительных единицах):

E_*	0,58	1	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
$F_{в0*}$	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Расчетная и нормальная характеристики должны быть близки друг к другу, но их полное совпадение не является обязательным.

Расчет характеристики холостого хода можно провести на цифровой электронной вычислительной машине по программе, данной в приложении I.

7-12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС РЕАКЦИИ ЯКОРЯ

Для определения МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания нужного потока при нагрузке, необходимо учитывать влияние реакции якоря. Амплитуда первой гармоники МДС реакции якоря при токе $I_ф$

$$F_a = 0{,}45\, m \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_ф. \quad (7\text{-}90)$$

Для количественного учета влияния реакции якоря на магнитное поле машины обычно МДС F_a разлагают на две составляющие — продольную $F_d=F_a \sin\psi$, максимум которой совпадает с осью полюсов, и поперечную $F_q=F_a \cos\psi$, максимум которой совпадает с осью, проходящей через середину межполюсного пространства. Угол ψ является углом между током $I_ф$ и ЭДС E_0. Магнитодвижущие силы якоря и обмотки возбуждения имеют различное пространственное распределение и поэтому одинаковые их значения создают различные потоки. Для удобства совместного рассмотрения одну из МДС необходимо привести к другой. Так как обычно при расчетах используется характеристика холостого хода, то целесообразно МДС якоря привести к МДС обмотки возбуждения. Для этого F_d и F_q заменяются эквивалентными, т. е. создающими такие же потоки первой гармоники, МДС обмотки возбуждения F_{ad} и F_{aq}. При переходе от F_d и F_q к F_{ad} и F_{aq} вводят коэффициенты k_{ad} и k_{aq}:

$$\left.\begin{aligned} F_{ad} &= k_{ad} F_d; \\ F_{aq} &= k_{aq} F_q. \end{aligned}\right\} \quad (7\text{-}91)$$

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} зависят от отношений $b_p/\tau=\alpha$, δ/τ и могут быть найдены из рис. 7-23.

В ненасыщенной машине можно принимать, что продольное и поперечное поля существуют независимо и не оказывают взаимного влияния друг на друга. При наличии насыщения такое допущение может внести в расчет погрешности. Однако учет взаимного влияния продольного и поперечного потоков в насыщенной машине связан с большими трудностями и может быть сделан приближенно.

На основе анализа магнитных полей в синхронных машинах при нагрузке и насыщении [27, 28] были определены коэффициенты $\varkappa_d$ и $\varkappa_q$ (рис. 7-24), на которые нужно умножить МДС F_{ad} и F_{aq}, чтобы получить соответствующие их значения F'_{ad} и F'_{aq} при учете насыщения. Эти коэффициенты получены в функции $F_{\delta za}/F_\delta$, т. е. отношения суммы магнитных напряжений воздушного зазора, зубцов и спинки статора к маг-

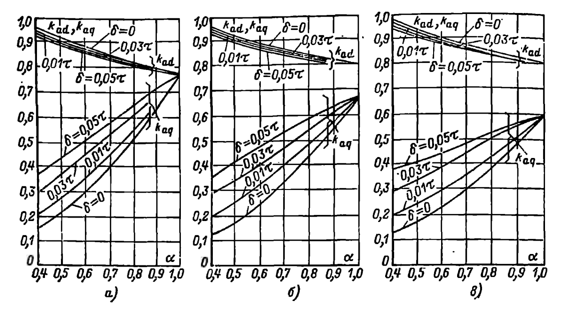


Рис. 7-23. Кривые для определения коэффициентов k_{ad} и k_{aq}.
а — при $\delta_m/\delta=1$; б — при $\delta_m/\delta=1{,}5$; в — при $\delta_m/\delta=2$.

нитному напряжению воздушного зазора. Коэффициенты $\overline{\varkappa}_d$ и $\overline{\varkappa}_q$ получены для машин с равномерным воздушным зазором, а $\widetilde{\varkappa}_d$ и $\widetilde{\varkappa}_q$ — для

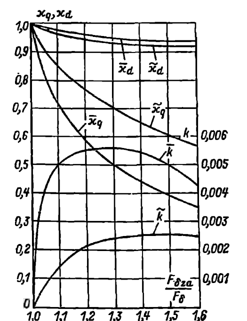


Рис. 7-24. Зависимость коэффициентов $\varkappa_d$, $\varkappa_q$ и k от $F_{\delta za}/F_\delta$.

машин, у которых зазор изменяется согласно уравнению

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos\frac{x\pi}{\tau}}, \qquad (7\text{-}92)$$

где x — расстояние от оси полюса до рассматриваемой точки.

Коэффициенты $\widetilde{\varkappa}_d$ и $\widetilde{\varkappa}_q$ можно с некоторым приближением применить и для машин, у которых $\delta_m/\delta=1{,}5$.

Как известно, поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и усиление его под другим. В ненасыщенной машине результирующий поток полюса при этом не изменяется. При насыщении магнитной цепи увеличение потока под одним из краев полюса происходит в меньшей мере, чем ослабление под другим, и результирующий поток (его первая гармоника) уменьшается. Для компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря необходимо увеличивать МДС обмотки возбуждения на F_{qd}.

При равномерном воздушном зазоре F_{qd} можно определить по формуле

$$F_{qd} = \overline{k}\frac{b_p}{\delta}F_a\cos\psi = \overline{k}\frac{b_p}{\delta}F_q, \qquad (7\text{-}93)$$

а при зазоре, изменяющемся по (7-92), по формуле

$$F_{qd} = \widetilde{k}\frac{\tau}{\delta}F_q. \qquad (7\text{-}94)$$

На рис. 7-24 даны зависимости $\overline{k}$ и $\widetilde{k}$ от отношения $F_{\delta za}/F_\delta$.

7-13. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ МАШИНЫ

При построении векторных диаграмм, а в дальнейшем и при расчете характеристик синхронных машин необходимо знать параметры обмотки статора.

Активное сопротивление обмотки статора, Ом, определяется из (4-33):

$$r_1 = \frac{\rho_\vartheta w_1 l_{\text{ср}1}}{n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} a}, \qquad (7\text{-}95)$$

где ρ_ϑ — удельное сопротивление проводника обмотки по табл. 4-1; $q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}$ — сечение эффективного проводника, м²;

$l_{\text{ср}1} = 2(l_1 + l_{\text{л}})$ — средняя длина витка обмотки статора.

Длину лобовой части $l_{\text{л}}$ определяют при жестких секциях по (6-138), а для всыпных обмоток по (6-135).

Активное сопротивление фазы в относительных единицах равно:

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{\text{н.ф}}}{U_{\text{н.ф}}}. \qquad (7\text{-}96)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора x_σ обусловлено полями рассеяния пазовой и лобовой частей обмотки, а также высшими гармониками поля в воздушном зазоре (дифференциальное рассеяние) и определяется по следующей формуле:

$$x_\sigma = 15{,}8 \frac{f}{100} \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{p q_1} \times$$
$$\times (\lambda_{\text{п,к}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}}), \qquad (7\text{-}97)$$

где $\lambda_{\text{п,к}}$, $\lambda_{\text{л}}$, $\lambda_{\text{д}}$ — коэффициенты удельной (на единицу длины) проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния.

Коэффициент удельной проводимости паза $\lambda_{\text{п,к}}$ состоит из двух составляющих: одной, пропорциональной проводимости между стенками паза, $\lambda_{\text{п}}$ и другой — проводимости по коронкам зубцов $\lambda_{\text{к}}$:

$$\lambda_{\text{п,к}} = \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{к}}. \qquad (7\text{-}98)$$

Коэффициент $\lambda_{\text{п}}$ в зависимости от конфигурации паза определяют по табл. 6-22.

Коэффициент $\lambda_{\text{к}}$ определяют по формуле

$$\lambda_{\text{к}} = \left[\alpha \lambda'_{\text{к}} + \left(0{,}22 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + 0{,}32 \sqrt{\frac{t_1 - b_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}}}\right)(1 - \alpha)\right] k'_\beta, \qquad (7\text{-}99)$$

где t_1 — зубцовое деление статора; $b_{\text{ш}}$ — ширина шлица паза (при открытых пазах $b_{\text{ш}} = b_{\text{п}1}$); α — коэффициент полюсного перекрытия (из § 7-9); k'_β — по (6-151); $\lambda'_{\text{к}}$ — по рис. 7-25 в зависимости от отношения $b_{\text{ш}}/\delta' k_\delta$.

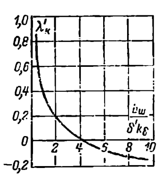


Рис. 7-25. Зависимость $\lambda'_{\text{к}}$ от отношения $b_{\text{ш}}/\delta' k_\delta$.

При больших отношениях $b_{\text{ш}}/\delta' k_\delta$ проводимость $\lambda'_{\text{к}}$ становится отрицательной, что приводит к уменьшению $\lambda_{\text{п,к}}$. Это уменьшение связано с искривлением силовых линий поля рассеяния вблизи воздушного зазора по сравнению с прямолинейным законом их распределения, как это было принято при выводе формулы для $\lambda_{\text{п}}$.

Коэффициент проводимости лобового рассеяния определяют по (6-154).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния приближенно определяют по формуле

$$\lambda_{\text{д}} = 0{,}03 \frac{\tau \alpha_\delta}{\delta' k_\delta q_1}. \qquad (7\text{-}100)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$$x_{\sigma*} = x_\sigma \frac{I_{\text{н.ф}}}{U_{\text{н.ф}}}. \qquad (7\text{-}101)$$

Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad} F_{aн}}{k_{\mu0} F_{\delta0}}, \qquad (7\text{-}102)$$

где $F_{aн}$ — МДС статора при номинальном токе [по (7-90)];

$F_{\delta0}$ — магнитное напряжение воздушного зазора при $E = U_{н,ф}$;

k_{ad} — по рис. 7-23;

$k_{\mu0} = F_{b0}/F_\delta$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и зазора между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины; он может быть найден из расчета магнитной цепи для точки, соответствующей $E = 0{,}5U_{н.ф}$.

Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq} F_{aн}}{k_{\mu0} F_{\delta0}} \frac{1 + k_\delta}{2}. \qquad (7\text{-}103)$$

Коэффициент k_{aq} определяют по рис. 7-23; k_δ — коэффициент воздушного зазора — по (7-66).

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma*}. \qquad (7\text{-}104)$$

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma*}. \qquad (7\text{-}105)$$

7-14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Для определения МДС обмотки возбуждения при нагрузке используют векторные диаграммы (рис. 7-26).

При построении векторных диаграмм целесообразно использовать относительные значения параметров, тока, напряжения, ЭДС и МДС.

Для более точного определения потока рассеяния полюсов при нагрузке необходимо иметь частичные характеристики намагничивания:

$$\Phi_* = E_* = f(F_{\delta za*}),\ \Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta za*}),$$
$$\Phi_{m*} = f(F_{mj*}) \text{ (рис. 7-27).}$$

Здесь принято: $\Phi_* = \Phi/\Phi_б$, $\Phi_{\sigma*} = \Phi_\sigma/\Phi_б$, $\Phi_{m*} = \Phi_m/\Phi_б$, $\Phi_б$ — базовое значение потока, равное потоку при номинальном фазном напряжении:

$$F_{\delta za*} = F_{\delta za}/F_{в,б},$$

$F_{mj*} = F_{mj}/F_{в,б}$, $F_{в,б}$ — базовое значение МДС, равное МДС обмотки возбуждения при холостом ходе

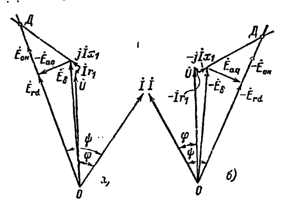


Рис. 7-26. Векторные диаграммы.
а — для генератора; *б* — для двигателя.

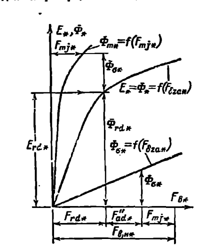


Рис. 7-27. Частичные характеристики намагничивания.

и номинальном фазном напряжении.

Для оценки насыщения машины удобно построить зависимость $E_* = f(F_{\delta za}/F_\delta)$ (рис. 7-28). Указанные графики строятся по данным расчета магнитной цепи машины.

Диаграмма при заданных номинальных значениях тока ($I_{н,ф*} = 1$), напряжения ($U_{н,ф*} = 1$) и угла между ними строится следующим образом,

1. В выбранном масштабе для тока и напряжения откладывают вектор номинального фазного тока и под углом φ к нему вектор фазного напряжения.

2. К вектору напряжения пристраивают векторы падения напряжения $\dot{I}_* r_{1*}$, $j\dot{I}_* x_{\sigma *}$ для генератора и $-\dot{I}_* r_{1*}$, $-j\dot{I}_* x_{\sigma *}$ для двигателя, в результате чего находят ЭДС $\dot{E}_\delta$, которая наводится в обмотке якоря

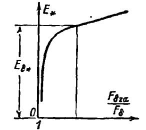


Рис. 7-28. Зависимость E от отношения $F_{\delta za}/F_\delta$.

при нагрузке. При $I_* = 1$ векторы падения напряжения численно равны r_{1*} и $x_{\sigma *}$. В крупных машинах падение напряжения в активном сопротивлении r_1 относительно мало и им можно пренебречь.

3. По $E_{\delta *}$ из зависимости $E_* = f(F_{\delta za}/F_\delta)$ определяют отношение $F_{\delta za}/F_\delta$, по которому из рис. 7-24 находятся коэффициенты $\varkappa_q$, $\varkappa_d$ и k.

4. Определяют направление вектора результирующей ЭДС по продольной оси E_{rd} и угол ψ. Для этой цели находят МДС (в относительных единицах)

$$\frac{\varkappa_q k_{aq} F_a}{F_{\text{в},\text{б}}} = \varkappa_q k_{aq} F_{a*};$$

$$F_{a*} = \frac{0,45\, m w_1 k_{\text{об}1} I_{\text{н},\text{ф}}}{p F_{\text{в},\text{б}}},$$

отложив которую по оси абсцисс характеристики $E_* = f(F_{\delta za*})$, на оси ординат получают ЭДС, равную $E_{aq*}/\cos\psi$. Добавляя эту ЭДС к вектору $j\dot{I}_* x_\sigma$ (или $-j\dot{I}_* x_{\sigma *}$), получают точку $Д$, через которую пройдет линия, совпадающая с направлением ЭДС $\dot{E}_{rd*}$ (или $-\dot{E}_{rd*}$). Угол между током $\dot{I}_*$ и этой линией является углом ψ.

5. Опустив перпендикуляр из конца вектора $j\dot{I}x_\sigma$ (или $-j\dot{I}x_\sigma$) на линию $ОД$, находят ЭДС E_{rd*}, наводимую в обмотке якоря результирующим потоком по продольной оси $E_{rd*} = \Phi_{rd*}$. Из характеристики $E_* = f(F_{\delta za*})$ по E_{rd} определяют МДС F_{rd*} (см. рис. 7-27).

6. Определяют МДС продольной реакции якоря:

$$F'_{ad*} = \varkappa_d k_{ad} F_{a*} \sin\psi + k\frac{\tau}{\delta} F_{a*}\cos\psi.$$

7. По сумме $F_{rd*} + F'_{ad*}$ по характеристике $\Phi_{\sigma *} = f(F_{\delta za*})$ определяют поток рассеяния полюса $\Phi_{\sigma *}$.

8. По потоку полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma *}$ из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ определяют сумму магнитных напряжений ротора F_{mj*}.

9. Находят МДС обмотки возбуждения при нагрузке в относительных единицах

$$F_{\text{п},\text{н}*} = F_{rd*} + F'_{ad*} + F_{mj*}$$

и в физических единицах (амперах)

$$F_{\text{п},\text{н}} = F_{\text{п},\text{н}*} F_{\text{п},\text{б}}.$$

Из характеристики холостого хода $E_* = f(F_{\text{п}0*})$ по $F_{\text{н},\text{п}*}$ определяют ЭДС $E_{0\text{н}*}$, наводимую в обмотке статора при холостом ходе, а затем находят изменение напряжения на выводах машины (для генератора):

$$\Delta U_* = E_{0\text{н}*} - 1.$$

7-15. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения синхронных машин подключается к источнику постоянного тока. До недавнего времени для питания обмоток возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока — возбудители.

В настоящее время для возбуждения синхронных машин все чаще стали применять статические устройства. Новые серии синхронных машин общепромышленного применения 13—21-го габаритов (СД-2, СГ-2, СДН-2 и т. д.) оснащены комплектными тиристорными возбудительными устройствами (ТВУ). Особенностью ТВУ является бесконтактное и быстродействующее управление током возбуждения во всех эксплуатационных режимах и наличие автоматического регулиро-

вания возбуждения. Это повышает надежность и улучшает использование машин. Кроме того, КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем генераторов постоянного тока.

На рис. 7-29 дана структурная схема одного из применяемых в настоящее время ТВУ. В этих устройствах питание обмотки возбуж-

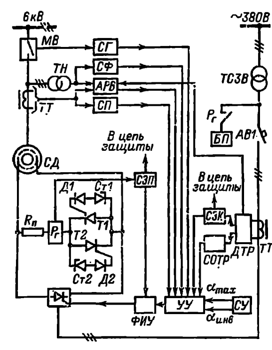


Рис. 7-29. Структурная схема тиристорного возбудителя устройства синхронного двигателя (питание от сети 380 В).

СГ — схема гашения поля; *СФ* — схема форсировки возбуждения; *АРВ* — автоматический регулятор возбуждения; *СП* — схема пуска; *СЗП* — схема защиты пускового сопротивления; *ФИУ* — фазоимпульсное устройство; *УУ* — устройство управления; *БП* — блок питания; *СЗК* — схема защиты от коротких замыканий; *СОТР* — схема ограничения тока ротора; *ДТР* — датчик тока ротора; *СУ* — схема уставок угла регулирования; $Р_г$ — герконное реле.

дения происходит через тиристорный преобразователь или от сети переменного тока с напряжением 380 В через согласующий трансформатор *ТСЗВ* (рис. 7-29), или от дополнительной трехфазной обмотки, расположенной на статоре. Преобразователи осуществляют выпрямление переменного тока в постоянный и имеют трехфазную схему со средним выводом при выпрямленном напряжении до 100 В или трехфазную мостовую при напряжении выше 100 В. Параллельно

Таблица 7-10

Тип	Номинальные данные ТВУ				Пусковое сопротивление $R_п$, Ом
	I, А	U, В	P, кВт	$U_{потолочное}$, В	
ТВУ-46-320	320	46	14,7	80	0,385
ТВУ-65-320	320	65	20,8	115	0,51
ТВУ-80-320	320	80	25,6	140	0,64
ТВУ-105-320	320	105	33,6	185	0,8
ТВУ-137-320	320	137	43,8	240	1,02
ТВУ-166-320	320	166	53	290	1,44
ТВУ-195-320	320	195	62	340	1.44
ТВУ-247-320	320	247	79	435	1,6

обмотке возбуждения синхронного двигателя через тиристорный ключ подключено пусковое сопротивление $R_п$.

Управление тиристорным преобразователем осуществляется фазоимпульсным устройством *ФИУ*.

Функции управления и регулирования в ТВУ осуществляет электронная система управления, в комплект которой входит ряд блоков, показанных на рисунке.

В табл. 7-10 даны номинальные данные тиристорных возбудительных устройств серии ТВУ, разработанных ЦПКТБ КЭМ для синхронных двигателей.

Кроме того, для синхронных машин 13-го и 14-го габаритов разработаны тиристорные возбудительные устройства с питанием от дополнительной обмотки статора. Выпрямленное напряжение этих устройств 25—36 В при токе 140—170 А.

Иногда для возбуждения синхронных машин применяют бесконтактные системы. В этом случае к обмотке возбуждения непосредственно (без контактных колец) подводят выпрямленное напряжение от машины переменного тока небольшой мощности (синхронной или асинхронной), якорь которой располагается на одном валу с синхронной машиной. Выпрямители закрепляют на роторе, и они вращаются вместе с ним.

При проектировании обмоток возбуждения для улучшения теплоотдачи и заполнения катушки медью

стремятся увеличить сечение проводников обмотки и уменьшить число ее витков при соответствующем увеличении тока возбуждения.

В связи с этим напряжение для питания обмотки возбуждения выбирается низким и в некоторых случаях нестандартным. В качестве предварительных значений можно наметить следующую шкалу напря-

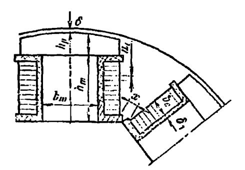


Рис. 7-30. Однорядные обмотки возбуждения синхронных машин.

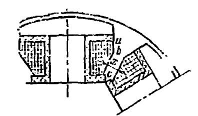


Рис. 7-31. Многорядные обмотки возбуждения.

жений: 25, 35, 45, 65, 80, 100, 115, 160, 200, 230 В, которая, однако, не является строго обязательной, и в зависимости от конкретной схемы возбуждения напряжения могут иметь иные значения. Меньшие значения напряжения выбирают для машин небольшой мощности. Учитывая переходное падение напряжения $\Delta U_{щ}$ в контакте между щеткой и кольцом, напряжение на обмотке возбуждения U_c следует брать на 1—2 В меньше, чем напряжение возбудительного устройства.

Обмотки возбуждения выполняют однорядными (рис. 7-30) и многорядными (рис. 7-31). Многорядные катушки имеют скошенную форму.

Для синхронных машин мощностью от сотен киловатт и выше, как правило, применяют однорядные обмотки, которые выполняют из полосовой голой меди сечением больше 30 мм², намотанной на ребро. Однорядные обмотки более надежны и вследствие лучшего охлаждения допускают большие плотности тока, чем многорядные. Многорядные обмотки применяют для машин небольшой мощности.

Изоляция катушек однорядных обмоток возбуждения для машин мощностью свыше 100 кВт дана в табл. 7-11 в соответствии с рис. 7-32.

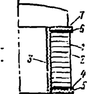


Рис. 7-32. Изоляция катушки однорядной обмотки возбуждения.

В табл. 7-12 и на рис. 7-33 представлена изоляция многорядных обмоток для машин мощностью менее 100 кВт.

При расчете обмотки возбуждения ее МДС увеличивается на 10—20% по сравнению со значением, полученным из векторной диаграммы для номинального режима,

$$F'_{в,н} = (1,1 \div 1,2) F_{в,н}. \quad (7\text{-}106)$$

Сечение проводника обмотки возбуждения q_c, м², предварительно определяют по формуле

$$q_e = \frac{\rho_\theta \, 2 \, \sigma F'_{в.н} \, l_{еср}}{U_e}, \quad (7\text{-}107)$$

где ρ_θ — удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки, Ом·м; для однослойной обмотки из голой меди и изоляции класса В $\rho_{130} = 1/39 \cdot 10^6$ Ом·м, для многослойных обмоток при изоляции класса В $\rho_{120} = 1/40 \cdot 10^6$ Ом·м;

U_e — напряжение на обмотке возбуждения, В;

$l_{еср}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, м.

Предварительно средняя длина витка, м, может быть взята:

для многорядных обмоток

$$l_{еср} = 2(l_m + b_m + 4\delta_1) + \pi b_{кт}; \quad (7\text{-}108)$$

для однорядных:

Таблица 7-11

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 кВт

Позиция на рис. 7-32	Материал		Число слоев	Общая толщина, мм	Примечание
	Наименование	Толщина, мм			
1	Медь полосовая	—	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для классов нагревостойкости А, Е, В применяются лакировка глифталебакелитовым лаком, для классов F и Н — лаком на кремнийорганической основе
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3 8	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнениях применять только стекломикафолий или формовочный миканит
4, 6	Миканит прокладочный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой
5	Стеклотекстолит	5	1	5	Для класса нагревостойкости А нормального исполнения вместо стеклотекстолита применяется гетинакс
7	То же	8	1	8	

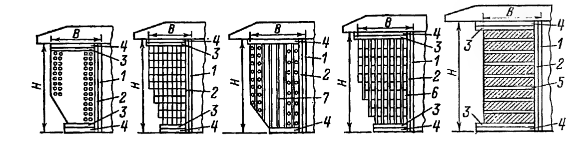


Рис. 7-33. Изоляция многорядных катушек обмотки возбуждения.

а) с лобовой частью в виде полуокружности (рис. 7-34)

$$l_{еср} = 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_e); \quad (7\text{-}109)$$

б) с лобовой частью в виде прямолинейного участка с двумя закруглениями (рис. 7-35; применяют при $b_m > 20$ см)

$$l_{еср} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\delta_1 + b_e). \quad (7\text{-}110)$$

В (7-108)—(7-110) δ_1 — односторонняя толщина изоляции полюса, $\delta_1 \approx (1{,}5 \div 2{,}0)\cdot 10^{-3}$ м; δ_1 можно также выбрать по табл. 7-11 и 7-12; δ'' — расстояние от центра закругления с радиусом r до края штампованной части полюса:

b_m, м	δ'', м	b_m, м	δ'', м
До 0,06	0,01	0,12—0,15	0,02
0,06—0,1	0,0125	0,15—0,2	0,03
0,1 —0,12	0,015		

r — радиус закругления, м, $r \approx b_e$; $b_{кт}$ — толщина катушки обмотки возбуждения, м; b_e — ширина проводника обмотки, м.

Предварительно, пока не известны размеры катушки обмотки и размеры проводника, можно принять:

для многорядных обмоток $b_{кт} \approx \approx 2{,}5\cdot 10^{-2}$ м при $D \leqslant 0{,}3$ м и $b_{кт} \approx \approx 5\cdot 10^{-2}$ м при $D > 0{,}3$ м;

для однорядных обмоток $b_e \approx \approx (0{,}05 \div 0{,}1)\,\tau$.

Напряжение U_e может быть задано или его следует выбрать. При выборе напряжения, подводимого к

Таблица 7-12

Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 кВт

Позиция на рис. 7-33	Классы А и В нормального исполнения			Классы А и В усиленно влагостойкого исполнения			Классы F и H всех исполнений и класс В химически стойкого и тропического исполнений		
	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев
1	Слюдинитофолий	0,12	16	Микафолий (или формовочный миканит)	0,2 (0,5)	8 (3)	Стекломикафолий (или миканит формовочный)	0,2 (0,5)	8 (3)
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Бумага телефонная лакировочная	0,07	3	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык
3	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1
4	Гетинакс	3—5	1	Гетинакс	3—5	1	Стеклотекстолит	3—5	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками
6	Слюдинит гибкий	0,2	1	Миканит гибкий	0,2	1 между слоями	Стекломиканит гибкий	0,22	1 между слоями
7	Бумага конденсаторная	0,03	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же

Примечание. Материалы (миканиты, стекломикафолий, стеклотекстолит) должны иметь связующие, соответствующие выбранному классу изоляции.

обмотке возбуждения, необходимо учитывать некоторые особенности, связанные с выполнением и охлаждением обмотки. Для машин мощностью до 100 кВт, в которых применяют многорядные обмотки, напряжение возбуждения следует выбрать таким, чтобы получить сечение прямоугольных проводников возможно большим, но не выше 30—40 мм². Для малых машин при сечении проводника меньше 2,5 мм² применяют круглые провода.

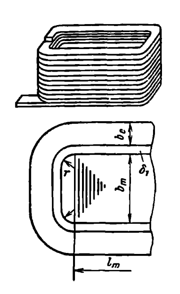


Рис. 7-34. К определению средней длины витка однорядных обмоток с лобовой частью в виде полуокружности.

В крупных машинах (при $P_н >$ 100 кВт), для которых следует применять однорядные обмотки, сечение прямоугольных проводников должно быть больше 30—40 мм², но не выше 300 мм². По конструктивным и технологическим требованиям отношение сторон проводника должно быть не больше 10—15. Намотку обмотки ведут на ребро. Допустимая плотность тока в проводниках обмотки зависит от класса нагревостойкости изоляции и условий охлаждения. В современных синхронных машинах изоляция обмоток возбуждения имеет класс нагревостойкости B или F.

Однорядные обмотки выполняют из голой прямоугольной меди. Изоляция витков состоит из двух слоев асбестовой бумаги общей толщиной после опрессовки 0,3 мм, приклеенной лаком к широкой стороне проводника.

Для многорядных обмоток применяют изолированные проводники с изоляцией класса нагревостойкости B или F, например марки ПСД.

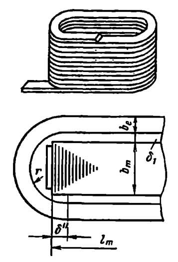


Рис. 7-35. Лобовая часть с двумя закруглениями.

Предварительно значения плотности тока в проводниках обмотки возбуждения J_e можно выбрать в следующих пределах:

Для однорядных обмоток крупных машин	$(3,5—5,3)\cdot 10^6$ А/м²
Для многорядных обмоток	$(3,2—3,8)\cdot 10^6$ А/м²

Меньшие значения плотности тока выбираются для машин, имеющих бóльшую длину.

Ток возбуждения

$$I_{в,н} = q_e J_e. \qquad (7\text{-}111)$$

Определив ток возбуждения, можно найти число витков в катушке полюса обмотки возбуждения:

$$w_e = F_{в,н}/I_{в,н}. \qquad (7\text{-}112)$$

В некоторых случаях, когда задается ток возбуждения $I_{в.н}$, витки обмотки могут быть определены по (7-112), исходя из МДС $F'_{р,н}$. Поперечное сечение проводников обмотки по выбранной плотности тока определяют как

$$q_e = I_{в,н}/J_e. \qquad (7\text{-}113)$$

Для многорядных обмоток по найденному сечению проводника

(по табл. П-29) определяют его размеры $a_e \times b_e$. Отношение сторон проводников b_e/a_e должно находиться в пределах 1,5—2.

Проведя раскладку проводников по слоям, вычерчивают масштабный эскиз, по которому определяют размеры катушки. Намотку можно производить как на широкую, так и на узкую стороны проводника.

Размеры проводников при этом берутся с учетом изоляции для выбранной марки провода (по табл. П-30).

Для возможности размещения катушек на полюсах, а также для прохождения охлаждающего воздуха между катушками соседних полюсов в нижней их части должно быть предусмотрено расстояние не менее 0,7—1,0 см (расстояние x на рис. 7-31).

Для однорядных обмоток меньший размер прямоугольного проводника определяют, исходя из найденного числа витков и выбранной ранее высоты полюсного сердечника h_m:

$$a_e = \frac{h_m - \delta_{к.п}}{w_e + 1} - \delta_п, \quad (7\text{-}114)$$

где $\delta_п$ — изоляция между витками: $\delta_п \approx 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ м;

$\delta_{к.п}$ — суммарная толщина изоляции обмотки от полюсного наконечника и ярма ротора:

для машин $P_н < 100$ кВт $\delta_{к.п} = (7 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м;
для машин $P_н > 100$ кВт $\delta_{к.п} = (10 \div 15) \cdot 10^{-3}$ м

(бо́льшие значение берут для крупных машин).

По сечению q_e определяют возможные размеры широкой части провода, м,

$$b_e = q_e/a_e. \quad (7\text{-}115)$$

Далее по табл. П-32 выбирают близкие к найденным размеры стандартной прямоугольной меди $a_e \times b_e$. После того как определились размеры проводника обмотки возбуждения, необходимо проверить расстояние между катушками соседних полюсов (расстояние x на рис. 7-31):

$$x \approx \frac{\pi (D - 2\delta - 2h_р - 2h_{п})}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_e. \quad (7\text{-}116)$$

Это расстояние должно быть не менее 7 мм.

Для проверки нагрева обмотки возбуждения уточняют плотность тока

$$J_e = I_{в.н}/a_e b_e \quad (7\text{-}117)$$

и определяют превышение температуры, °С, по нижеприведенным формулам.

Для многорядных обмоток

$$\Delta\vartheta_e = \frac{\left(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}\right) F_{в.н} J_e}{76 \cdot 10^8 \Pi_e \left(1{,}6 + \sqrt{v_р}\right)} \times \left[1 + \frac{\delta_{пе}(m - 0{,}5)\left(1{,}6 + \sqrt{v_р}\right) \cdot 10^2}{2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}}\right], \quad (7\text{-}118)$$

где $\delta_{пе}$ — двусторонняя изоляция проводников, м;

m — число слоев в наиболее широкой части катушки;

Π_e — периметр боковой части катушки, м (abc на рис. 7-31);

$v_р$ — окружная скорость вращения ротора, м/с.

Для однорядных катушек

$$\Delta\vartheta_e = \frac{3 \cdot 10^{-10}\left(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}\right) b_e J_e^2}{1{,}6 + \sqrt{v_р}}. \quad (7\text{-}119)$$

Согласно ГОСТ 183-74 допустимое превышение температуры для многорядных обмоток равно 80° С при изоляции класса нагревостойкости В и 100° С при изоляции класса нагревостойкости F. Для однорядных обмоток с оголенными поверхностями допустимые превышения температуры соответственно равны 90 и 110° С.

При расчете машины допустимое превышение температуры следует принимать на 10—15° С меньше по сравнению с рекомендованной ГОСТ.

Если превышение температуры получится больше или, наоборот, много меньше допустимого, то необходимо произвести пересчет обмотки возбуждения, что может потребоваться и в том случае, если расстояние x будет мало.

При пересчете можно попытаться изменить значения некоторых из рекомендуемых ниже величин: плотности тока в обмотках, соотношения между сторонами прямоугольного проводника, высоты и в небольших пределах (3—6%) ширины полюсного сердечника, сечения проводника за счет изменения напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, воздушного зазора.

После того как окончательно установлены размеры обмотки возбуждения, уточняют размеры полюса, среднюю длину витка по (7-108)—(7-110) и ток возбуждения $I_{в,н}$.

Определяют сопротивление обмотки возбуждения:

$$r_в = \rho_\vartheta \frac{2p\omega_c l_{ср}}{q_e}. \quad (7\text{-}120)$$

Значения ρ_ϑ см. стр. 299 и табл. 4-1.

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и температуре 130° С (или 120° С для многорядных обмоток)

$$U'_{ен} = r_{в130} I_{в,н}. \quad (7\text{-}121)$$

Коэффициент запаса возбуждения (находится в пределах 1,1—1,2)

$$k_e = \frac{U_{не}}{U'_{ен} + \Delta U_{щ}}, \quad (7\text{-}122)$$

где $U_{не}$ — номинальное напряжение возбудительного устройства.

7-16. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ

Параметрами машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток. В § 7-13 были определены некоторые параметры обмотки статора. Здесь даются расчетные формулы для нахождения параметров роторных обмоток и параметров обмотки якоря, которые необходимы для расчетов переходных и несимметричных режимов работы машины. Приведенные ниже формулы дают значения параметров в относительных единицах. Параметры цепей ротора приведены к числу витков обмотки статора.

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_{e*} = 1{,}27\, k_{ad} x_{ad*} \times \left(1 + \frac{4k_{\mu0} F_{\delta0}\, l'_m \Sigma\lambda}{\Phi_\delta}\right), \quad (7\text{-}123)$$

где l'_m — расчетная длина сердечника полюса, м, по (7-52);

$F_{\delta0}$ и Φ_δ — магнитное напряжение воздушного зазора и поток при $E = U_{н,ф}$;

$$\Sigma\lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1{,}53} + \frac{\lambda_{m,b}}{2{,}65};$$

λ_{pl}, λ_{ml}, λ_{mb} определяются по (7-81)—(7-83).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{\sigma e*} = x_{e*} - x_{ad*}. \quad (7\text{-}124)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси

$$x_{kd*} = 7{,}9 \frac{F_{ан}}{\Phi_\delta} \frac{10^{-6}}{1 - k_b} \times \left[\frac{l_p}{N_c}(\lambda_b + \lambda_{д,у}) + \lambda_{Rd}\right], \quad (7\text{-}125)$$

по поперечной оси

$$x_{kq*} = 7{,}9 \frac{F_{ан}}{\Phi_\delta} \frac{10^{-6}}{1 + k_b} \times \left[\frac{l_p}{N_c}(\lambda_b + \lambda_{д,у}) + \lambda_{Rq}\right]. \quad (7\text{-}126)$$

Здесь l_p — длина полюсного наконечника, м;

$F_{ан}$ — МДС статора при номинальном токе;

N_c — число стержней на полюс;

λ_b — коэффициент проводимости пазового рассеяния. При круглых полуоткрытых пазах (рис. 7-20)

$$\lambda_b = \left(0{,}785 - \frac{b_s}{2d_s}\right) + \frac{h_s}{b_s};$$

$\lambda_{д,у}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния: $\lambda_{д,у} = t_2/12\delta' k_\delta$;

λ_{Rd}, λ_{Rq} — коэффициенты проводимости короткозамыкающих колец по продольной и поперечной осям: $\lambda_{Rd}=0{,}19\,\tau C_d/N_c$; $\lambda_{Rq}=0{,}19\,\tau C_q/N_c$; коэффициенты приведения C_d и C_q находят по рис. 7-36;

k_b — коэффициент распределения демпферной (пусковой) обмотки:

$$k_b=\frac{\sin N_c\alpha_b}{N_c\sin\alpha_b};\ \alpha_b=\pi t_2/\tau.$$

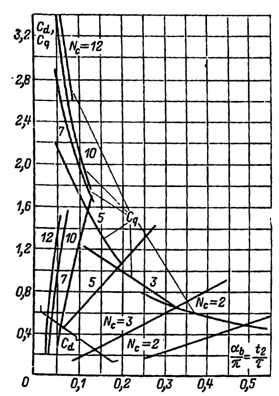


Рис. 7-36. Коэффициенты приведения C_d и C_q для расчета проводимости короткозамыкающих колец.

Значения k_b можно также найти рис. 7-37.

Формулы (7-125) и (7-126) получены для наиболее часто применяемого случая равномерного распределения стержней на полюсном наконечнике и полной (продольно-поперечной) демпферной (пусковой) обмотки.

При неполной обмотке (продольной) x_{hd*} определяют по (7-125), а

$$x_{kq*}\approx(3\div4)\,x_{kd*}. \qquad (7\text{-}127)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности для двухслойных обмоток, Ом,

$$x_0=\frac{2{,}18\,l_1F_{a\text{п}}\cdot10^{-6}}{\Phi_6 q_1 k_y^2}\left[(\beta-0{,}555)\frac{h_{\text{п}1}}{b_{\text{п}1}}+\right.$$

$$\left.+(3\beta-2)\frac{h_4}{b_{\text{п}1}}\right]+0{,}355\frac{F_{a\text{п}}(3\beta-2)}{F_{\delta0}k_y^2}\times$$

$$\times\left[\left(\frac{1}{3q_1}\right)^2+0{,}39\left(\beta-\frac{2}{3}\right)-\right.$$

$$\left.-\left(\beta-\frac{2}{3}\right)^2+\frac{1}{27}\right], \qquad (7\text{-}128)$$

где $\beta=y_1/3q_1$ — укорочение шага обмотки статора;

k_y — коэффициент укорочения шага обмотки статора для первой гармоники — по (7-39);

$h_{\text{п}1}$, $b_{\text{п}1}$ — высота и ширина паза статора;

h_4 — высота верхней части

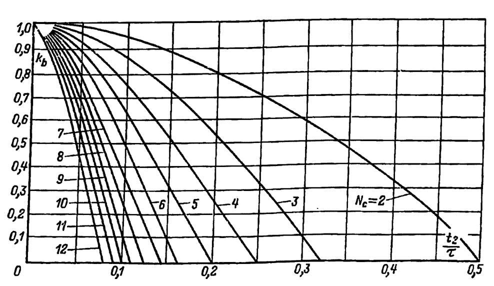


Рис. 7-37. Коэффициенты распределения для успокоительной (пусковой) обмотки.

паза, не занятой обмоткой;

q_1 — число пазов на полюс и фазу обмотки статора.

При отсутствии демпферной (пусковой) клетки перед вторым членом коэффициент 0,355 необходимо заменить на 0,71.

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x'_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*}\, x_{\sigma e*}}{x_{ad*} + x_{\sigma e*}}; \quad (7\text{-}129)$$

по поперечной

$$x'_{q*} = x_{q*}. \quad (7\text{-}130)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x''_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{kd*}\left(x'_{d*} - x_{\sigma*}\right)}{x_{kd*} + x'_{d*} - x_{\sigma*}}; \quad (7\text{-}131)$$

по поперечной оси

$$x''_{q*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*}\, x_{kq*}}{x_{aq*} + x_{kq*}}. \quad (7\text{-}132)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора обратной последовательности при работе машины на большое внешнее реактивное сопротивление

$$x_{2*} = \frac{x''_{d*} + x''_{q*}}{2}; \quad (7\text{-}133)$$

при работе машины на малое внешнее сопротивление (короткое замыкание)

$$x_{2*} = \sqrt{x''_{d*}\, x''_{q*}}. \quad (7\text{-}134)$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{e*} = \frac{0{,}44\, F_{a,н}\, k_{ad}^2\, l_{e\,ср}}{10^8\, \Phi_б\, f w_e\, q_e}. \quad (7\text{-}135)$$

Активное сопротивление демпферной (пусковой) клетки при равномерном распределении стержней из однородного материала по продольной оси

$$r_{kd*} = \frac{2{,}16}{10^8 f}\, \frac{F_{aн}}{\Phi_б}\, \frac{1}{1 - k_в} \times$$

$$\times \left[\frac{c_с\, l_с}{q_с\, N_с} + \frac{c_{к,з}\, \tau C_d}{q_{к,з}\, N_с}\right]; \quad (7\text{-}136)$$

по поперечной оси

$$r_{kq*} = \frac{2{,}16}{10^8 f}\, \frac{F_{aн}}{\Phi_б}\, \frac{1}{1 + k_в} \times$$

$$\times \left[\frac{c_с\, l_с}{q_с\, N_с} + \frac{c_{к,з}\, \tau C_q}{q_{к,з}\, N_с}\right]; \quad (7\text{-}137)$$

$l_с$ — длина стержня, м, по (7-61);

C_d и C_q — коэффициенты приведения (по рис. 7-36);

$c_с$ и $c_{к,з}$ — отношения удельных сопротивлений материала стержня и кольца к удельному сопротивлению меди (для меди эти коэффициенты равны 1, для латуни 4, для фосфористой бронзы 6,5).

В случае применения стержней из разнородного материала приближенно сопротивление демпферной (пусковой) обмотки можно найти по (7-136) и (7-137), заменив в них первый член в скобках выражением

$$\frac{c'_с\, c''_с\, l_с}{\left(c''_с N'_с + c'_с N''_с\right) q_с}, \quad (7\text{-}138)$$

где $N'_с$ — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением $c'_с$;

$N''_с$ — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением $c''_с$.

Постоянная времени представляет собой отношение индуктивности данной обмотки к ее омическому сопротивлению. От постоянной времени зависит продолжительность протекания переходных процессов в синхронной машине.

Постоянная времени, с, обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора демпферной (пусковой)

$$T_{d0} = x_{e*}/\omega r_{e*}, \quad (7\text{-}139)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Постоянная времени обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_{d*}}{x_{d*}}. \quad (7\text{-}140)$$

Таблица 7-13

Параметры явнополюсных синхронных генераторов и двигателей в относительных единицах

Схема	$x_{\sigma *}$	r_{1*}	x_{d*}	x_{q*}	x'_{d*}	x''_{d*}	x''_{q*}	x_{2*}	x_{0*}
С демпферной (пусковой) обмоткой	0,1—0,2	0,008—0,02	1—2,4	0,6—1,6	0,2—0,6	0,15—0,3	0,15—0,4	0,15—0,35	0,02—0,2
Без демпферной (пусковой) обмотки	0,1—0,2	0,08—0,02	1—2,4	0,6—1,6	0,2—0,6	—	—	0,3—0,8	0,04—0,25

Таблица 7-14

Постоянные времени явнополюсных синхронных генераторов и двигателей

Схема	T_{d0}, с	T'_d, с	$T''_{kd\,\text{в}}$, с	T_a, с
С демпферной (пусковой) обмоткой	2—10	0,8—2,5	0,01—0,08	0,03—0,35
Без демпферной (пусковой) обмотки	2—10	0,8—2,5	—	0,1—0,5

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки при разомкнутых обмотках статора и возбуждения:

по продольной оси

$$T_{kd0} = \frac{x_{ad*} + x_{kd*}}{\omega r_{kd*}}; \qquad (7\text{-}141)$$

по поперечной оси

$$T_{kq0} = \frac{x_{aq*} + x_{kq*}}{\omega r_{kq*}}. \qquad (7\text{-}142)$$

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора

$$T''_{kd\text{в}} = \frac{x_{kd*}\, x_{\sigma e*} + x_{ad*}\, x_{kd*} + x_{\sigma e*}\, x_{ad*}}{\omega r_{kd*}\,(x_{\sigma e*} + x_{ad*})}. \qquad (7\text{-}143)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси при замкнутых накоротко обмотке возбуждения и обмотке статора

$$T''_{kd} = T''_{kd\text{в}} \frac{x''_{d*}}{x'_{d*}}. \qquad (7\text{-}144)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по поперечной оси полюсов при замкнутой накоротко обмотке статора

$$T''_{kq} = \frac{x''_{q*}}{x_{q*}} T_{kq0}. \qquad (7\text{-}145)$$

Постоянная времени обмотки статора при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a = \frac{x_{2*}}{\omega r_{1*}}. \qquad (7\text{-}146)$$

Пределы изменения параметров и постоянных времени для выполненных синхронных машин общего назначения даны в табл. 7-13 и 7-14.

7-17. МАССА АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для оценки массогабаритных параметров спроектированной машины, для расчета потерь и т. п. возникает необходимость в определении массы активных материалов. В дальнейшем, после разработки конструкции может быть определена масса конструкционных материалов, а затем и масса всей машины.

При определении массы активных материалов необходимые для расчета размеры берут (в метрах) из параграфов, указанных в скобках, или из соответствующих формул.

Масса зубцов статора, кг,

$$m_{z1} = 7800\, l_{ст1} k_c h_{п1} b_{z1/3} Z_1, \quad (7\text{-}147)$$

где

$$b_{z1/3} = \frac{\pi (D+h_{п1})}{Z_1} - b_{п1};$$

$l_{ст1}$ — по (7-10); $h_{п1}$ — по (7-28); $b_{п1}$ — по (7-27) или по эскизу паза.

Масса ярма магнитопровода статора, кг,

$$m_{a1} = 7800\, l_{ст1} k_c \pi (D_a - h_a) h_a, \quad (7\text{-}148)$$

где h_a — по (7-32).

Масса меди обмотки статора, кг,

$$m_{м1} = 8900\, q_{эф} u_п Z_1 l_{ср1}/2, \quad (7\text{-}149)$$

где $q_{эф}$ — по (7-29), $u_п$ — по (7-15) или (7-19); $l_{ср1}$ — см. § 7-13.

Масса меди обмотки возбуждения, кг (см. § 7-15),

$$m_{м.в} = 8900\, q_e l_{еср} 2p w_e. \quad (7\text{-}150)$$

Масса меди стержней демпферной (пусковой) обмотки, кг (см. § 7-10),

$$m_{м.с} = 8900\, q_c \cdot 2p N_c l_c. \quad (7\text{-}151)$$

Масса меди короткозамыкающих колец, кг (см. § 7-10),

$$m_{м.к.з} = 8900\, q_{к.з} (D - 2\delta - 2h_я - 2d_в) 2\pi. \quad (7\text{-}152)$$

Масса стали полюсов, кг (см. § 7-9),

$$m_m = 7800\, l'_m k_{с.р} \times 2p (h_m b_m + 0{,}8\, h_p b_p). \quad (7\text{-}153)$$

Масса стали обода ротора, кг (см. § 7-9),

$$m_j = 7800\, l_j \pi (D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j) h_j, \quad (7\text{-}154)$$

где h_{mp} по (7-79); для h_j берутся уточненные значения, полученные из механического расчета.

По этим данным можно найти общие затраты меди и активной стали в машине:

Полная масса меди

$$m_м = m_{м1} + m_{м.в} + m_{м.с} + m_{м.к.з}. \quad (7\text{-}155)$$

Полная масса активной стали

$$m_{ст} = m_{z1} + m_{a1} + m_m + m_j. \quad (7\text{-}156)$$

Разделив (7-155) и (7-156) на полную номинальную мощность $S_н$, находят массу активных материалов на единицу мощности:

$$q_м = m_м / S_н; \quad (7\text{-}157)$$

$$q_{ст} = m_{ст} / S_н. \quad (7\text{-}158)$$

7-18. ПОТЕРИ И КПД

Потери в синхронной машине можно разделить на основные и добавочные. Ниже приводится расчет этих потерь для номинального режима работы.

Основные потери. Основные электрические потери в обмотке статора, кВт,

$$P_{э1} = m I^2_{н.ф} r_1 \cdot 10^{-3}. \quad (7\text{-}159)$$

Потери на возбуждение, кВт, при наличии возбудителя, сочлененного с валом машины, согласно ГОСТ 11828-75 определяют с учетом потерь в возбудителе:

$$P_в = \frac{I^2_{в.н} r_в + 2\Delta U_щ I_{в.н}}{\eta_в} \cdot 10^{-3}. \quad (7\text{-}160)$$

Для машин, возбуждаемых от отдельно установленных устройств,

$$P_в = \left(I^2_{в.н} r_в + 2\Delta U_щ I_{в.н}\right) \cdot 10^{-3}, \quad (7\text{-}161)$$

$I_{н.ф}$ $I_{в.н}$ — номинальные значения тока якоря и тока возбуждения;

$\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения в щеточном контакте ($\Delta U_щ = 1$ В);

$\eta_в$ — КПД возбудителя ($\eta_в = 0{,}8 \div 0{,}85$).

Сопротивления обмоток r_1 и $r_в$ определяют по (7-95) и (7-120) соответственно и приводят к расчетной рабочей температуре, равной 75° С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В или 115° С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости F и H.

Магнитные потери в ярме магнитопровода статора, кВт,

$$P_{a1} = k_{да} p_{a1/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1{,}3} \times m_{a1} \cdot 10^{-3}. \quad (7\text{-}162)$$

Магнитные потери в зубцах магнитопровода статора, кВт,

$$P_{z1}=k_{дz}p_{z1/50}B^2_{z1/3}\left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}m_{z1}, \quad (7\text{-}163)$$

где $p_{a1/50}$ и $p_{z1/50}$ — удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, которые следует взять из табл. П-26 для соответствующей марки стали;

$k_{дa}$ и $k_{дz}$ — коэффициенты, учитывающие увеличение потерь из-за частичного замыкания листов вследствие наличия заусенцев, а также изменения структуры стали при штамповке:

При $P_н < 100$ кВт $k_{дa}=1,5$; $k_{дz}=2$
При $P_н > 100$ кВт $k_{дa}=1,3$; $k_{дz}=1,7$

B_a и $B_{z1/3}$ — индукция в ярме статора и зубце статора на $1/3$ высоты зубца при $E=U_{н,ф}$ ($E_*=1$, см. расчет характеристики холостого хода).

Механические потери, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию, кВт,

$$P_{мех}\approx 3,68p\left(\frac{v_р}{40}\right)^3\sqrt{l_1}, \quad (7\text{-}164)$$

где $v_р$ — окружная скорость ротора, м/с;

l_1 — полная длина статора, м.

Добавочные потери. Добавочные потери возникают в машине как при холостом ходе, так и при нагрузке.

При холостом ходе возникают потери, кВт, на поверхности полюсных наконечников из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора:

$$P_{пов}=0,5\cdot 2p\alpha\tau l_1k_0\left(\frac{Z_1n}{10\,000}\right)^{1,5}\times$$

$$\times(B_0t_1\cdot 10^3)^2\cdot 10^{-3}, \quad (7\text{-}165)$$

где $B_0=B_{\delta0}(k_{\delta1}-1)$; $B_{\delta0}$ — индукция при $E=U_{н,ф}$, Тл;

$k_{\delta1}$ — коэффициент воздушного зазора;

k_0 — коэффициент: $k_0=4,6$ при полюсах из листов толщиной 1 мм и $k_0=8,6$ при полюсах из листов толщиной 2 мм; при массивных полюсных наконечниках $k_0=23,3$;

α — коэффициент полюсного перекрытия;

Z_1 — число зубцов статора (l_1, τ и t_1 подставляются в метрах).

Добавочные потери при нагрузке $P_{доб}$ появляются в обмотках статора из-за вихревых токов и в стали, как в статоре, так и в полюсных наконечниках ротора от высших гармонических магнитного поля якоря.

Приближенно полные добавочные потери при нагрузке $P_{доб}$ можно определить в процентах полезной мощности для генераторов и от подводимой мощности для двигателей:

Для машин до 1000 кВ·А 0,5%
Для машин более 1000 кВ·А 0,25—0,4%

Общие потери при номинальной нагрузке

$$\Sigma P=P_{э1}+P_в+P_{a1}+P_{z1}+$$

$$+P_{мех}+P_{пов}+P_{доб}. \quad (7\text{-}166)$$

Коэффициент полезного действия для генератора

$$\eta=1-\frac{\Sigma P}{P_н+\Sigma P}; \quad (7\text{-}167)$$

для двигателя

$$\eta=1-\frac{\Sigma P}{P_{1н}}, \quad (7\text{-}168)$$

где $P_н=mU_{н,ф}I_{н,ф}\cos\varphi$ — номинальная активная мощность генератора, кВт;

$P_{1н}$ — активная мощность, подводимая к двигателю при номинальной нагрузке, кВт: $P_{1н}=mU_{н,ф}I_{н,ф}\cos\varphi$.

7-19. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

а) Основные характеристики

Рабочие свойства машины определяются ее характеристиками. Для генераторов основными характеристиками являются внешняя, регулировочная, U-образная и угловая; для двигателей — рабочие, U-образная и угловая. Для построения всех указанных характеристик используют векторные диаграммы.

Регулировочная характеристика генератора представляет собой за-

висимость $I_{в*}=f(I_*)$ при $U_*=\mathrm{const}$ и $\cos\varphi=\mathrm{const}$ (рис. 7-38). Для построения этой характеристики задают ряд значений тока якоря в пределах от 0 до 1 и при одних и тех же значениях U_* и $\cos\varphi$ строят векторные диаграммы, из которых

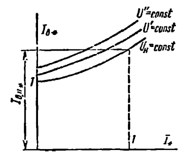


Рис. 7-38. Регулировочные характеристики.

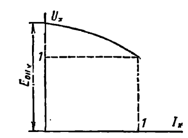


Рис. 7-39. Внешняя характеристика.

находят ток возбуждения. Ток возбуждения при $I_*=0$ определяют из характеристики холостого хода по заданному напряжению. Для регулировочной характеристики при $U_*=1=\mathrm{const}$ и $\cos\varphi=\cos\varphi_н=\mathrm{const}$ ток возбуждения, соответствующий номинальному току якоря, можно определить по векторной диаграмме, построенной раньше для нахождения МДС обмотки возбуждения (§ 7-14). Эта МДС в относительных единицах равна току возбуждения $I_{в,н*}$.

Внешняя характеристика $U_*=f(I_*)$ при $I_{в,н*}=\mathrm{const}$ и $\cos\varphi_н=\mathrm{const}$ (рис. 7-39) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки. Исходная точка этой характеристики имеет координаты $U_*=1$ и $I_*=1$. При токе $I_*=0$ напряжение $U_*=E_{0н*}$ берут из векторной диаграммы, построенной для номинального режима машины. Промежуточные точки характеристики можно найти, построив ряд регулировочных характеристик при различных значениях напряжения $U_ф$. Напряжения U_*, при которых строят регулировочные характеристики, берут в пределах от E_{0*} до 1, а $\cos\varphi=\cos\varphi_н$. Точки пересечения регулировочных характеристик с прямой, проведенной параллельно

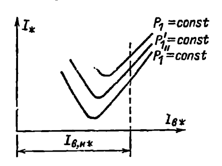


Рис. 7-40. U-образные характеристики.

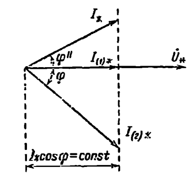


Рис. 7-41. К построению U-образных характеристик.

оси абсцисс при $I_{в*}=I_{в,н*}$, дают искомые точки внешней характеристики.

U-образные характеристики $I_*=f(I_{в*})$ при $P_1=mU_фI_ф\cos\varphi=\mathrm{const}$ (рис. 7-40) можно получить путем построения ряда векторных диаграмм при $U=1=\mathrm{const}$ и $I_*\cos\varphi=\mathrm{const}$ (рис. 7-41). Из построенных векторных диаграмм для каждого значения тока I_* определяют ток возбуждения $I_{в*}$.

Угловые характеристики дают зависимость активной мощности от θ (угла нагрузки): $P=f(\theta)$ при $U_*=1$ и $E_{0*}=\mathrm{const}$. Угол θ является углом между осью полюсов и осью результирующего магнитного поля или между векторами ЭДС $E_{0н*}$ и напряжения U_*. Построение угловых характеристик с учетом насыщения машины связано с большими трудностями. Ниже приводит-

ся расчет этой характеристики без учета насыщения. Параметры в этом случае принимают постоянными, равными их значению для ненасыщенной машины.

Характеристику при $U_*=1$ в относительных единицах строят по уравнению

$$P_* = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin\theta + + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}}\right)\sin 2\theta. \quad (7\text{-}169)$$

Электродвижущую силу E'_{0*} определяют по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при токе возбуждения $I_{в.н*}$. При построении характеристики $P_*=f(\theta)$ угол θ изменяется в пределах от 0 до π.

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость машины, равную отношению $P_m/P_н$. Номинальная мощность $P_н$ в относительных единицах равна $\cos\varphi_н$. Если пренебречь активным сопротивлением (что возможно для машин средней и большой мощности), то можно принять

$$\frac{P_{m*}}{P_{н*}} = \frac{M_{m*}}{M_{н*}}, \quad (7\text{-}170)$$

где M_{m*} и $M_{н*}$ — максимальный и номинальный моменты.

Статическую перегружаемость можно также рассчитать по формуле

$$\frac{P_{m*}}{P_{н*}} = \frac{M_{m*}}{M_{н*}} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}\cos\varphi_н} k_{р.с}. \quad (7\text{-}171)$$

Коэффициент $k_{р.с}$ учитывает реактивные составляющие мощности и момента, обусловленные неодинаковыми индуктивными сопротивлениями x_d и x_q. Он берется по рис. 7-42 в зависимости от отношения $(x_{d*}-x_{q*})/E'_{0*}x_{q*}$.

Как уже отмечалось ранее, статическая перегружаемость синхронных двигателей общего назначения должна быть не ниже 1,65.

Для синхронных двигателей U-образные и угловые характеристики строят так же, как и для генераторов, с использованием соответствующих векторных диаграмм.

Рабочие характеристики двигателей, т. е. зависимости P_{1*}, I_*, $\cos\varphi$, η, $M_*=f(P_{2*})$ при $U_*=1=\text{const}$ и $I_{в.н*}=\text{const}$ могут быть получены по U-образным характеристикам. Для этого необходимо построить несколько U-образных характеристик при различных значениях $P_{1*}=\text{const}$ и $U_*=1=\text{const}$. По этим характеристикам при $I_{в*}=I_{в.н}$ находят ток I при данном значении мощности P_{1*} и $\cos\varphi=P_1/mU_{н.ф}I$.

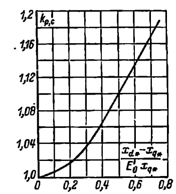


Рис. 7-42. К определению коэффициента $k_{р.с}$.

Затем определяют мощность на валу $P_2=P_1-\Sigma P$ (ΣP — потери в машине для данного режима работы), $\eta=P_2/P_1$, $M=P_2/\Omega_1$ ($\Omega_1=2\pi n_н/60$).

б) Токи короткого замыкания

При расчете механических усилий, воздействующих на лобовые части обмотки статора и на их бандажи, исходят из наибольшего мгновенного значения тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при данном значении возбуждения. Этот ток называется ударным током короткого замыкания.

Согласно ГОСТ 183-74 синхронная машина должна выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном 105% номинального:

$$I_{уд*} = \frac{I_{уд}}{\sqrt{2}\, I_{н.ф}} = 1{,}8\frac{1{,}05}{x''_{d*}}. \quad (7\text{-}172)$$

Коэффициент 1,8 учитывает затухание апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Для машин без демпферной обмотки в (7-172) вместо x''_{d*} следует подставить x'_{d*}.

Практический интерес представляют кратности установившихся токов короткого замыкания. Под этим понимают отношение установившегося тока короткого замыкания к номинальному току обмотки якоря.

Кратность при возбуждении холостого хода, т. е. при возбуждении, которое при номинальной частоте вращения и разомкнутой обмотке якоря дает на выводах машины номинальное напряжение, обозначают ОКЗ (отношение короткого замыкания):

$$\text{ОКЗ} = I_{к0*} = E'_{0н*}/x_{d*}, \quad (7\text{-}173)$$

где $E'_{0н*}$ — ЭДС, определяемая по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при $I_{в*}=1$.

Кратность при номинальном токе возбуждения $I_{в.н*}$

$$I_{к.н*} = E'_{0*}/x_d. \quad (7\text{-}174)$$

в) Пусковые характеристики

Основным методом пуска синхронных двигателей в настоящее время является асинхронный пуск. Для этого в полюсах ротора размещается пусковая обмотка по типу короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя.

Оценку пусковых свойств двигателя производят по пусковым характеристикам, т. е. зависимостям тока в статоре и момента от скольжения I_*, $M_*=f(S)$. Наибольший интерес на этих характеристиках представляют величины, соответствующие $s=1$ — начальный пусковой ток $I_{п*}$ и начальный пусковой момент $M_{п*}$, а также момент при скольжении $s=0,05$ — входной момент в синхронизм $M_{вх*}$.

При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать, что в отличие от ротора обычного асинхронного двигателя ротор синхронного явнополюсного двигателя имеет как магнитную, так и электрическую несимметрию. Если условно подразделить пусковую обмотку на две части, то можно принять, что по продольной оси машины на роторе располагаются две обмотки, одной из которых является обмотка возбуждения, а другой — часть пусковой обмотки, представляющая ее эффект по продольной оси. По поперечной оси на роторе имеется только пусковая обмотка, представляющая ее эффект по поперечной оси. Необходимо также учитывать, что обмотка статора по продольной и поперечной осям имеет неодинаковые индуктивные сопротивления ($x_d \neq x_q$).

На основании сказанного полное сопротивление по продольной оси машины, которое зависит от скольжения s, будет равно:

$$\underline{Z}_{ds} = jx_\sigma + \frac{1}{\dfrac{1}{jx_{ad}} + \dfrac{1}{\dfrac{r'_e}{s} + jx_{\sigma e}} + \dfrac{1}{\dfrac{r_{kd}}{s} + jx_{kd}}}, \quad (7\text{-}175)$$

где $r'_в \approx (10 \div 12) r_в$ [$r_в$ по (7-135)].

Полное сопротивление по поперечной оси

$$\underline{Z}_{qs} = jx_\sigma + \frac{1}{\dfrac{1}{jx_{aq}} + \dfrac{1}{\dfrac{r_{kq}}{s} + jx_{kq}}}. \quad (7\text{-}176)$$

В приведенных формулах значения всех параметров берут в относительных единицах (здесь и далее звездочка в обозначениях величин в относительных единицах опускается).

Вследствие магнитной и электрической несимметрии машины в статоре помимо тока I' основной частоты f_1 протекают токи I'' частоты $(2s-1)$. Значения их могут быть найдены по следующим формулам [32]:

ток якоря частоты f_1

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{U}\left(\underline{Z}_{ds} + \underline{Z}_{qs} + \dfrac{2r_1}{2s-1}\right)}{(\underline{Z}_{ds} + r_1)\left(\underline{Z}_{qs} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right) + (\underline{Z}_{qs} + r_1)\left(\underline{Z}_{ds} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right)}; \quad (7\text{-}177)$$

ток якоря частоты $(2s-1)$

$$\dot{I}''_1 = \frac{\dot{U}(\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{(\underline{Z}_{ds} + r_1)\left(\underline{Z}_{qs} + \frac{r_1}{2s-1}\right) + (\underline{Z}_{qs} + r_1)\left(\underline{Z}_{ds} + \frac{r_1}{2s-1}\right)}; \quad (7\text{-}178)$$

действующее значение тока статора

$$I_1 = \sqrt{I'^2_1 + I''^2_1}; \quad (7\text{-}179)$$

момент вращения

$$M = \left(\dot{U}I'_{1a} - I'^2_1 r_1 + I''^2_1 \frac{r_1}{2s-1}\right)\frac{1}{\cos\varphi_н}, \quad (7\text{-}180)$$

где I'_{1a} — активная составляющая тока I'_1.

Последний член выражения в скобках соответствует моменту, создаваемому током I''_1. При скольжениях $s>0{,}5$ этот момент положительный, а при $s<0{,}5$ — отрицательный, в результате чего в кривой $M=f(s)$ могут наблюдаться провалы. Из-за наличия провалов в кривой момента при разгоне двигатель может застрять на промежуточной скорости и не войти в синхронизм. Обычно для уменьшения провала в кривой момента обмотку ротора замыкают на добавочный резистор с сопротивлением, примерно в 10 раз бо́льшим сопротивления самой обмотки.

В этом случае при определении $\underline{Z}_{ds}$ и $\underline{Z}_{qs}$, как уже указывалось, сопротивление r'_e принимается равным $(10-12)r_e$.

Расчет по приведенным формулам связан с большой вычислительной работой. Его можно упростить, если у машин средней и большой мощности пренебречь активным сопротивлением r_1. Тогда получим:

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{U}(\underline{Z}_{qs} + \underline{Z}_{ds})}{2\underline{Z}_{qs}\underline{Z}_{ds}};$$

$$\dot{I}''_1 = \frac{\dot{U}(\underline{Z}_{qs} - \underline{Z}_{ds})}{2\underline{Z}_{qs}\underline{Z}_{ds}}; \quad (7\text{-}181)$$

$$M = UI'_{1a}\frac{1}{\cos\varphi_н}. \quad (7\text{-}182)$$

Погрешность такого расчета по сравнению с расчетом по (7-177)—(7-180) не превышает 4%.

Для построения пусковых характеристик задают ряд значений скольжения s в пределах от 1 до 0,05 и для каждого его значения определяют ток I_1 и M. Иногда можно ограничиться расчетом начального пускового и входного моментов и начального пускового тока.

У серийных двигателей, выпускаемых в настоящее время промышленностью, эти значения находятся в следующих пределах:

$$M_{п*} = 0{,}8 \div 1{,}3;\ M_{вх*} = 0{,}9 \div 1{,}9;$$
$$I_{п*} = 4{,}5 \div 6{,}5.$$

7-20. ПРИМЕР РАСЧЕТА ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Проектное задание

1. Номинальная мощность $P_н=500$ кВт.
2. Номинальное напряжение (линейное) $U_н=6000$ В.
3. Номинальная частота вращения $n_н=500$ об/мин.
4. Частота $f=50$ Гц, $\cos\varphi_н=0{,}9$ (опережающий).
5. Кратность максимального момента $M_{m*}\approx 2{,}2$.

Режим работы — продолжительный. Конструкция — защищенная (IP11) с горизонтальным валом.

Номинальные параметры

1. Номинальное фазное напряжение (предполагается, что обмотка статора будет соединена в звезду)

$$U_{н,ф} = \frac{U_н}{\sqrt{3}} = \frac{6000}{3} = 3468 \text{ В}.$$

2. Номинальная полная мощность

$$S_н = \frac{P_н}{\eta_н\cos\varphi_н} = \frac{500\cdot 10^3}{0{,}937\cdot 0{,}9} = 593\cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{А}$$

(по табл. 7-3, исходя из номинальных данных машины, задаемся $\eta_н=0{,}937$).

3. Номинальный фазный ток

$$I_{н,ф} = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_н} = \frac{593\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 6000} = 57{,}1 \text{ А}.$$

4. Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n_н} = \frac{60\cdot 50}{500} = 6.$$

5. Расчетная мощность

$$S' = k_E S_н = 1{,}05\cdot 593\cdot 10^3 = 623{,}0\cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{А}.$$

Таблица 7-15

№ варианта	Число пазов Z_1	Число сегментов $s_{ст}$	Хорда H, м	Число пазов в сегменте $Z_s=Z_1/s$	Число пазов на полюс и фазу q_1	Число параллельных ветвей a	Число проводников в пазу $u_п$	Пазовое (зубцовое) деление t_1, м	Линейная нагрузка A, А/м
1	$81=3\cdot3\cdot3\cdot3$	9	0,402	9	$2^1/_4$	1	26	0,035	42 600
2	$90=2\cdot5\cdot3\cdot3$	5	0,695	18	$2^1/_2$	1	24	0,0314	44 000
3	$90=2\cdot5\cdot3\cdot3$	6	0,59	15	$2^1/_2$	1	24	0,0314	44 000
4	$90=2\cdot5\cdot3\cdot3$	9	0,402	10	$2^1/_2$	1	24	0,0314	44 000

Размеры статора

6. По рис. 7-8 для $S'=623$ кВ·А при $p=6$ предварительно находим внутренний диаметр статора $D=0{,}9$ м.

7. Внешний диаметр статора по (7-3)

$$D_a=k_д D=(1{,}28\div1{,}33)\,0{,}9=1{,}15\div1{,}2\,\text{м}.$$

По табл. 7-7 ближайший нормализованный внешний диаметр статора $D_a=1{,}18$ м (16-й габарит). Высота оси вращения $h=0{,}63$ м.

Поскольку найденный диаметр D_a лежит в пределах, задаваемых коэффициентом $k_д$, то пересчет диаметра D не производим.

8. Полюсное деление по (7-4)

$$\tau=\frac{\pi D}{2p}=\frac{3{,}14\cdot0{,}9}{12}=0{,}236\ \text{м}.$$

9. Расчетная длина статора. По рис. 7-9 для $\tau=0{,}236$ м при $p=6$ находим $A=440\cdot10^2$ А/м, $B_{\delta н}=0{,}89$ Тл. Задаемся: $\alpha_\delta=0{,}66$; $k_B=1{,}15$; $\alpha_\delta k_B=0{,}76$; $k_{об1}=0{,}92$.

По (7-5) определяем расчетную длину статора:

$$l_\delta=\frac{6{,}1S'}{\alpha_\delta k_B k_{об1} AB_{\delta н} D^2 n_н}=$$

$$=\frac{6{,}1\cdot623\cdot10^3}{0{,}76\cdot0{,}92\cdot44\,000\cdot0{,}89\cdot0{,}9^2\cdot500}=$$

$$=0{,}342\ \text{м}.$$

10. Находим λ по (7-6):

$$\lambda=\frac{l_\delta}{\tau}=\frac{0{,}342}{0{,}236}=1{,}45.$$

По рис. 7-11 устанавливаем, что найденные значения λ лежат в пределах, ограниченных кривыми при $p=6$.

11. Действительная длина статора (по 7-7)

$$l_1=1{,}05l_\delta=1{,}05\cdot0{,}342=0{,}36\ \text{м}.$$

12. Число вентиляционных каналов по (7-8) при $b_к=0{,}01$ м

$$n_к=\frac{l_1+l_{пак}}{l_{пак}+b_к}=\frac{0{,}36-(0{,}04\div0{,}05)}{(0{,}04\div0{,}05)+0{,}01}=$$

$$=6{,}4\div5{,}17.$$

Принимаем $n_к=6$.

13. Длина пакета по (7-9), м,

$$l_{пак}=\frac{l_1-n_к b_к}{n_к+1}=\frac{0{,}36-6\cdot0{,}01}{6+1}=$$

$$=0{,}043\ \text{м}.$$

14. Суммарная длина пакетов сердечника по (7-10)

$$l_{ст1}=l_{пак}(n_к+1)=0{,}043\,(6+1)=0{,}301\ \text{м}.$$

Зубцовая зона статора. Сегментировка

15. Число параллельных ветвей обмотки статора. Так как $I_{н.ф}=57{,}1<200$ А, то выбираем $a=1$.

16. Из рис. 7-13 (кривые 2) для $\tau=0{,}236$ м находим

$$t_{1min}=0{,}031\ \text{м};\quad t_{1max}=0{,}035\ \text{м}.$$

17. Максимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$$Z_{1max}=\frac{\pi D}{t_{1min}}=\frac{\pi\cdot0{,}9}{0{,}031}=91.$$

18. Минимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$$Z_{1min}=\frac{\pi D}{t_{1max}}=\frac{\pi\cdot0{,}9}{0{,}035}=81.$$

19. Число пазов магнитопровода статора. Так как $D_a>990$ мм, то статор выполняется сегментированным. В диапазоне $Z_{1max}-Z_{1min}$ требованиям п. 1—4 § 7-6 удовлетворяют числа пазов 81

$$\left(q=\frac{Z_1}{2pm}=\frac{81}{2\cdot6\cdot3}=2^1/_4;\quad t_1=\frac{\pi D}{Z_1}=\frac{\pi\cdot0{,}9}{81}=0{,}035\ \text{м}\right)\ \text{и}$$

$$90\ (q=2^1/_2;\ t_1=0{,}0314\ \text{м}).$$

20. Расчет числа проводников в пазу $u_п$ по (7-15), числа сегментов $s_{ст}$ и хорды H по (7-20), линейной нагрузки A по (7-16) сводим в табл. 7-15.

Наилучший результат даст вариант 3, который и принимаем для дальнейших расчетов.

$Z_1=90$; $s_{ст}=6$; $H=0{,}59$ м (сегменты штампуются из листов 600×1500 мм) $u_п=24$, $q_1=2^1/_2$, $t_1=0{,}0314$ м, $A=440\cdot10^2$ А/м.

Таблица 7-16

Спецификация паза (изоляция класса нагревостойкости В)

Позиция на рис. 7-43	Наименование	Число слоев		Толщина, мм	
		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод ПЭТВСД $\frac{1,8\times 7,1}{2,3\times 7,6}$ мм	1	24	$1\times 7,6$	$2(12\times 2,3)$
2	Лента стеклослюдинитовая ЛС 0,13 мм	6 слоев	Вполнахлеста	4,5	4,5
3	Лента стеклянная ЛЭС (покровная) 0,1 мм.	1 слой	Встык	0,2	0,2
	Двусторонняя толщина изоляции одной катушки			4,7	4,7
4	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 1 мм	—	2	—	2
5	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 0,5 мм	—	2	—	1
	Общая толщина изоляции на паз	—	—	4,7	12,4
	Разбухание изоляции	—	—	0,05	1,2
	Допуск на укладку	—	—	0,2	0,2
6	Клин	—	—	—	5
	Всего	—	—	12,5	74

Пазы и обмотка статора

21. Ширина паза (предварительная) по (7-21)

$$b_{п1} = 0,39t_1 = 0,39\cdot 0,0314 = 0,012 \text{ м} (12 \text{ мм}).$$

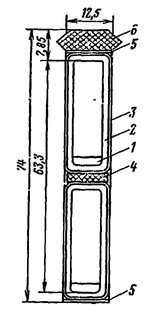


Рис. 7-43. Паз статора.

22. Поперечное сечение эффективного проводника обмотки статора (предварительно) по (7-22) ($I_{н.ф}=57,1$; $a=1$):

$$q_{эф} = \frac{I_{н.ф}}{aJ_1} = \frac{57,1}{1\cdot 4,9\cdot 10^6} = 11,7\cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \ (11,7 \text{ мм}^2),$$

где $J_1 = \frac{AJ_1}{A} = \frac{2150\cdot 10^8}{440\cdot 10^2} = 4,9\cdot 10^6$ А/м² (AJ_1 — по рис. 7-16, кривая 2).

23. Возможная ширина изолированного проводника по (7-25)

$$b'_{1из} = b_{п1} - \delta_{из.п} = 12 - 4,7 = 7,3 \text{ мм}.$$

Выбираем изоляцию катушек класса нагревостойкости В по табл. 3-2.

Двусторонняя толщина изоляции $\delta_{из.п}=4,7$ мм.

24. Размеры проводников обмотки статора. Принимаем, что эффективный проводник состоит из одного элементарного ($q_{эф}=11,7<18$ мм²). Марка провода ПЭТВСД с толщиной двусторонней изоляции 0,5 мм.

По табл. П-29 размеры медного проводника $a_1\times b_1=1,8\times 7,1$ мм (с изоляцией $a_{1из}\times b_{1из}=2,3\times 7,6$ мм), $q_{эф}=12,42$ мм² ($12,42\cdot 10^{-6}$ м²).

25. Ширина паза (уточненная) по (7-27)

$$b_{п1} = n_{ш} b_{1из} + \delta_{из.п} + \delta_{р.ш} + \delta_{ш} = 1\cdot 7,6 + 4,7 + 0,05 + 0,2 \approx 12,5 \text{ мм}.$$

26. Высота паза по (7-28)

$$h_{п1} = u_п n_в a_{1из} + \Sigma\delta_{из} + h_к + \delta_{р.в} + \delta_в = 24\cdot 1\cdot 2,3 + 12,4 + 5 + 1,2 + 0,2 \approx 74 \text{ мм},$$

где $\delta_{р.в} = 0,05 n_в u_п = 0,05\cdot 1\cdot 24 = 1,2$ мм.

Масштабный эскиз паза — на рис. 7-43; спецификация паза — в табл. 7-16.

27. Плотность тока в проводнике обмотки статора (уточненное значение)

$$J_1 = \frac{I_{н.ф}}{aq_{эф}} = \frac{57,1}{1\cdot 12,42\cdot 10^{-6}} = 4,6\cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

28. Проверка индукции в зубце (приближенно) по (7-31)

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta н}\, t_1\, l_\delta}{(t_1 - b_{п1})\, l_{ст1}\, k_c} =$$

$$= \frac{0,89\cdot 0,0314\cdot 0,33}{(0,0314 - 0,0125)\, 0,301\cdot 0,93} = 1,73 \text{ Тл}.$$

29. Проверка индукции в ярме статора (приближенно) по (7-32)

$$B_a = \frac{\alpha_\delta\, B_{\delta н}\, \tau l_\delta}{2h_a\, l_{ст1}\, k_c} =$$

$$= \frac{0,66\cdot 0,89\cdot 0,236\cdot 0,33}{2\cdot 0,066\cdot 0,301\cdot 0,93} = 1,24 \text{ Тл};$$

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{п1} =$$

$$= \frac{1,18 - 0,9}{2} - 0,074 = 0,066 \text{ м};$$

B_z и B_a находятся в допустимых пределах.

30. Перепад температуры в изоляции паза по (7-33)

$$\Delta\vartheta_{из} = \frac{J_1 A k_ф}{4,2\cdot 10^{11}}\, \frac{t_1}{2\,(b_{п1} + h_{п1} - h_к)} \times$$

$$\times \frac{0,5\delta_{пап}}{\lambda_{из}} = \frac{4,6\cdot 10^6\cdot 44\,000\cdot 1,1}{4,2\cdot 10^{11}} \times$$

$$\times \frac{0,0314}{2\,(0,0125 + 0,074 - 0,005)} \times$$

$$\times \frac{0,5\cdot 0,0047}{2,2\cdot 10^{-5}} = 11°\text{C} < 35°\text{C}.$$

31. Градиент температуры в пазовой изоляции

$$\Delta\vartheta'_{из} = \frac{\Delta\vartheta_{из}}{0,5\delta_{из.п}} = \frac{11}{0,00235} = 4700°\text{C/м}.$$

Проведенная проверка показала, что размеры паза выбраны удачно.

32. Витки фазы обмотки статора по (7-37)

$$w_1 = 2pq_1\, \frac{u_п}{2}\, \frac{1}{a} = 2\cdot 6\cdot 2^1/_2\, \frac{24}{2}\cdot 1 = 360.$$

33. Шаг обмотки по (7-38)

$$y_1 \approx (0,8 \div 0,86)\, \tau_п = (0,8 \div 0,85)\cdot 7,5 =$$

$$= 6 \text{ (из 1-го в 7-й паз)},\ \tau_п = 3q_1 =$$

$$= 3\cdot 2^1/_2 = 7,5,\ \beta = \frac{y_1}{\tau_п} = \frac{6}{7,5} = 0,8.$$

34. Коэффициент укорочения шага по (7-39)

$$k_y = \sin\frac{\pi}{2}\, \frac{y_1}{\tau_п} = \sin\frac{\pi}{2}\, \frac{6}{7,5} = 0,95.$$

35. Коэффициент распределения обмотки статора по (7-40)

$$k_р = \frac{0,5}{q_1 \sin\dfrac{\pi}{6q_1}} = \frac{0,5}{5\sin\dfrac{\pi}{6\cdot 5}} = 0,96.$$

Так как обмотка имеет q_1 дробное, то в формулу вместо q_1 подставляем $bd + c = 5$.

36. Обмоточный коэффициент по (7-41)

$$k_{об1} = k_y\, k_р = 0,95\cdot 0,96 = 0,915.$$

Воздушный зазор и полюса ротора

Исходя из заданного отношения $M_m/M_п \approx 2,2$, по рис. 7-18 находим $x_{d*} \approx 1,3$.

37. Приближенное значение воздушного зазора по (7-44)

$$\delta \approx 0,28\, \frac{A}{B_{\delta 0}}\, \frac{\tau}{x_{d*}}\, 10^{-6} =$$

$$= 0,28\, \frac{44\,000}{0,846}\, \frac{0,236}{1,3}\, 10^{-6} =$$

$$= 0,265\cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$B_{\delta 0} = 0,95 B_{\delta н} = 0,95\cdot 0,89 = 0,846 \text{ Тл}.$$

38. Принимаем воздушный зазор под серединой полюса 0,0027 м (2,7 мм). Зазор под краями полюса $\delta_m = 1,5\delta = 1,5\cdot 2,7 \approx 4,00$ мм. Среднее значение воздушного зазора

$$\delta' = \delta + (\delta_m - \delta)/3 = 0,0027 + (0,00400 - 0,0027)/3 = 0,00313 \text{ м } (3,13 \text{ мм}).$$

39. Ширина полюсного наконечника по (7-47). Примем $\alpha = 0,7$ (§ 7-9):

$$b_p = \alpha\tau = 0,7\cdot 0,236 = 0,165 \text{ м}.$$

40. Радиус дуги полюсного наконечника по (7-45)

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D\dfrac{\delta_m - \delta}{b_p^2}} =$$

$$= \frac{0,9}{2 + 8\cdot 0,9\dfrac{0,004 - 0,0027}{0,165^2}} = 0,384 \text{ м}.$$

41. Высота полюсного наконечника по табл. 7-9 при $\tau = 0,236$ м

$$h_p = 0,031 \text{ м}.$$

42. Длина сердечника полюса и полюсного наконечника

$$l_m = l_p = l_1 - 0,01 = 0,36 - 0,01 = 0,35 \text{ м}.$$

43. Расчетная длина сердечника полюса по (7-52). Принимаем $l_f = 0,02$ м:

$$l'_m = l_m + l_f = 0,35 + 0,02 = 0,37 \text{ м}.$$

44. Предварительная высота полюсного сердечника по (7-48)

$$h_m \approx 0{,}016 + 0{,}186\sqrt[4]{\tau} = 0{,}016 +$$
$$+ 0{,}186\sqrt[4]{0{,}236} = 0{,}146 \text{ м}.$$

45. Коэффициент рассеяния полюсов по (7-50). Из табл. $k=7$:

$$\sigma_m = 1 + k\frac{0{,}35\delta}{\tau^2} =$$
$$= 1 + 7\frac{0{,}35\cdot 0{,}0027}{0{,}236^2} = 1{,}118.$$

46. Ширина полюсного сердечника по (7-51). Задаемся $B_m=1{,}43$ Тл; $k_{c,p}=0{,}95$

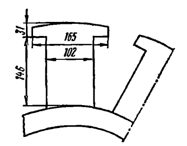


Рис. 7-44. Полюсы ротора.

(полюсы выполнены из стали Ст3 толщиной 1 мм):

$$b_m \approx \frac{\alpha_\delta B_{\delta н}\tau l_\delta}{B_m k_{c.p} l'_m}\sigma_m =$$
$$= \frac{0{,}66\cdot 0{,}89\cdot 0{,}236\cdot 0{,}33}{1{,}43\cdot 0{.}95\cdot 0{,}37}1{,}118 = 0{,}102 \text{ м}.$$

Выбираем $b_m=0{,}102$ м.

Эскиз полюсов дан на рис. 7-44.

Так как $v_p = \frac{\pi D n_п}{60} = \frac{\pi\cdot 0{,}9\cdot 500}{60} =$ $=23{,}6<30$ м/с, то принимаем крепление полюсов шпильками к ободу магнитного колеса.

47. Длина ярма (обода) ротора по (7-53)

$$l_j = l_m + \Delta l_c = 0{,}35 + 0{,}12 = 0{,}47 \text{ м}.$$

Выбрано $\Delta l_c=0{,}12$ м.

48. Минимальная высота ярма ротора по (7-54)

$$h_j = \frac{\alpha_\delta B_{\delta н}\tau l_\delta}{2B_j l_j}\sigma_m =$$
$$= \frac{0{,}66\cdot 0{,}89\cdot 0{,}236\cdot 0{,}33}{2\cdot 1{,}2\cdot 0{,}47}1{,}118 = 0{,}0450 \text{ м}.$$

Принято $B_j=1{,}2$ Тл; h_j уточняется по чертежу.

Пусковая обмотка

49. Число стержней пусковой обмотки на полюсе

$$N_c = 6.$$

50. Поперечное сечение стержня пусковой обмотки по (7-55)

$$q_c = \frac{(0{,}25\div 0{,}35)\tau A}{N_c J_1} =$$
$$= \frac{0{,}30\cdot 0{,}236\cdot 44\,000}{6\cdot 4{,}6\cdot 10^6} = 112\cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

51. Диаметр стержня по (7-56) [материал стержня — медь]

$$d_c = 1{,}13\sqrt{q_c} = 1{,}13\sqrt{112\cdot 10^{-6}} =$$
$$= 11{,}95\cdot 10^{-3} \text{ м} = 11{,}95 \text{ мм}.$$

Выбираем $d_c=12\cdot 10^{-3}$ м, тогда $q_c=$ $=113\cdot 10^{-6}$ м^2.

52. Зубцовый шаг на роторе по (7-57). Принимаем $z=0{,}01$ м:

$$\frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1} = \frac{0{,}165 - 0{.}012 - 2\cdot 0{,}01}{6-1} =$$
$$= 0{,}0265 \text{ м} = 26{,}5 \text{ мм}.$$

53. Проверяем условия (7-60)

$$0{,}8\cdot 0{,}0314 = 0{,}025 < 0{,}0265;$$
$$(6-1)\left(1 - \frac{0{,}0265}{0{,}0314}\right) = 0{,}790 > 0{,}75.$$

Пазы ротора выбираем круглые, полузакрытые.

54. Диаметр паза ротора

$$d_s = d_c + 0{.}0001 = 0{,}0121 \text{ м} = 12{,}1 \text{ мм}.$$

Раскрытие паза $b_s \times h_s = 4\times 2$ мм.

55. Длина стержня по (7-61)

$$l_c = l_p + 0{,}34\tau = 0{,}35 + 0{,}34\cdot 0{,}236 =$$
$$= 0{,}43 \text{ м}.$$

56. Сечение короткозамыкающего сегмента

$$q_{к.з} = b_{к.з}h_{к.з} = 0{,}5N_c q_c = 0{,}5\cdot 6\cdot 113\times$$
$$\times 10^{-6} = 340\cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 340 \text{ мм}^2.$$

По табл. П-32 выбираем прямоугольную медь 10×40 мм (сечение $q_{к.з}=$ $=399{,}1$ мм^2).

Расчет магнитной цепи

Для магнитопровода статора выбираем сталь 1511 (ГОСТ 214273-75) толщиной 0,5 мм. Полюсы ротора выполняют из стали Ст3 толщиной 1 мм. Крепление полюсов к ободу магнитного колеса осуществляют с помощью шпилек и гаек. Толщину обода (ярма ротора) принимаем $h_j=45$ мм (см. выше). (См. табл. П-13, П-24, П-25.)

57. Магнитный поток в зазоре по (7-62), Вб,

$$\Phi = \frac{E_1}{4\cdot 1{,}152\cdot 50\cdot 360\cdot 0{,}915} = 0{,}131\cdot 10^{-4}E_1.$$

По рис. 7-21 при $\delta_m/\delta \approx 1.5$, $\alpha=0{,}7$ и

$$\frac{\delta}{\tau} = \frac{0{,}0027}{0{,}236} = 0{,}0114 \text{ находим } k_в = 1{,}152.$$
$$\alpha_\delta = 0{,}66.$$

58. Уточненное значение расчетной длины статора по (7-64)

$$l_\delta = l_1 - b'_к n_к + 2\delta' = 0,36 -$$
$$- 0,00423 \cdot 6 + 2 \cdot 0,00313 = 0,34 \text{ м};$$
$$b'_к = \gamma' \delta = 1,56 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} = 0,423 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$
$$\gamma' = \frac{(b_к/\delta)^2}{5 + b_к/\delta} = \frac{(1 \cdot 10^{-2}/0,27 \cdot 10^{-2})^2}{5 + 1 \cdot 10^{-2}/0,27 \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 1,56.$$

59. Индукция в воздушном зазоре по (7-63), Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{0,131 \cdot 10^{-4}}{0,66 \cdot 0,236 \cdot 0,34} E_1 =$$
$$= 2,48 \cdot 10^{-4} E_1.$$

60. Коэффициент воздушного зазора статора по (7-67)

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1 + 10\delta'}{t_1 - b_{п1} + 10\delta'} =$$
$$= \frac{3,14 \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}}{(3,14 - 1,25) \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 1,255.$$

61. Коэффициент воздушного зазора ротора по (7-67)

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2 + 10\delta'}{t_2 - b_s + 10\delta'} =$$
$$= \frac{2,65 \cdot 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}}{(2,65 - 0,4) 10^{-2} + 10 \cdot 0,313 \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 1,075.$$

62. Коэффициент воздушного зазора по (7-66)

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,255 \cdot 1,075 = 1,35.$$

63. Магнитное напряжение воздушного зазора по (7-65), А,

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta =$$
$$= \frac{2,48 \cdot 10^{-4} \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} \cdot 1,35}{1,25 \cdot 10^{-6}} E_1 = 0,73 E_1.$$

64. Ширина зубца статора на высоте $1/3\ h_{п1}$ от его коронки по (7-70)

$$b_{z1^1/_3} = t_{z1^1/_3} - b_{п1} = 0,0332 -$$
$$- 0,0125 = 0,0207 \text{ м};$$
$$t_{z1^1/_3} = \frac{\pi (D + 2h_{п1}/3)}{Z_1} =$$
$$= \frac{\pi (0,9 + 2 \cdot 0,074/3)}{90} = 0,0332 \text{ м}.$$

65. Индукция в сечении зубца на высоте $1/3\ h_{п1}$ по (7-69), Тл,

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l_\delta}{b_{z1^1/_3} l_{ст1} k_с} =$$
$$= \frac{2,48 \cdot 10^{-4} \cdot 0,0314 \cdot 0,34}{0,0207 \cdot 0,301 \cdot 0,93} E_1 =$$
$$= 4,52 \cdot 10^{-4} E_1.$$

66. Магнитное напряжение зубцов статора по (7-68), А,

$$F_{z1} = h_{п1} H_{z1} = 0,074 H_{z1}.$$

67. Индукция в спинке статора по (7-74), Тл,

$$B_a = \frac{\Phi}{2 l_{ст} h_a k_с} =$$
$$= \frac{0,131 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,301 \cdot 0,066 \cdot 0,93} E_1 = 3,55 \cdot 10^{-4} E_1.$$

68. Магнитное напряжение спинки статора по (7-72), А,

$$F_a = \xi L_a H_a = 14,6 \cdot 10^{-2} \xi H_a;$$
$$L_a = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4p} = \frac{\pi (1,18 - 0,066)}{4 \cdot 6} =$$
$$= 14,6 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

ξ — по рис. 7-22.

69. Высота зубца ротора по (7-76)

$$h_{z2} = h_s + d_s = 0,2 \cdot 10^{-2} + 1,21 \cdot 10^{-2} =$$
$$= 1,41 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

70. Ширина зубца ротора на высоте $h_{z2}/3$ от его коронки по (7-78)

$$b_{z2^1/_3} = \frac{D - 2\delta - \frac{2}{3} h_{z2}}{D - 2\delta} t_2 - 0,94 d_s =$$
$$= \frac{(90 - 2 \cdot 0,27 - 2/3 \cdot 1,41) \cdot 10^{-2}}{(90 - 2 \cdot 0,27) \cdot 10^{-2}} \times$$
$$\times 2,65 \cdot 10^{-2} - 0,94 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2} = 1,48 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

71. Индукция в зубце ротора по (7-77), Тл,

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_2 l_\delta}{b_{z2^1/_3} l_p k_{с.р}} =$$
$$= \frac{2,48 \cdot 10^{-4} \cdot 2,65 \cdot 10^{-2} \cdot 34 \cdot 10^{-2}}{1,41 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95} E_1 =$$
$$= 4,62 \cdot 10^{-4} E_1.$$

72. Магнитное напряжение зубцов ротора по (7-75), А,

$$F_{z2} = h_{z2} H_{z2} = 1,41 \cdot 10^{-2} H_{z2}.$$

73. Удельная магнитная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов по (7-81)

$$\lambda_{ml} = \frac{0,55 h_m \cdot 10^{-6}}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)} =$$
$$= \frac{0,55 \cdot 14,6 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-6}}{\left[23,6 - 10,2 - \frac{\pi}{2 \cdot 6}(14,6 + 2 \cdot 3,1 + 2 \cdot 0,27)\right] \cdot 10^{-2}} =$$
$$= 1,03 \cdot 10^{-6}.$$

74. Удельная магнитная проводимость между внутренними поверхностями полюсных наконечников по (7-82)

$$\lambda_{pl} = \left[1{,}4\left(\frac{d_t}{a_p'} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{c_p}{a_p'} + 0{,}2\right) - 0{,}4\left(\frac{c_p}{a_p'} - 0{,}5\right)^2\right]\cdot 10^{-6} =$$

$$= \left[1{,}4\left(\frac{2{,}62\cdot 10^{-2}}{5{,}73\cdot 10^{-2}} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{3{,}15\cdot 10^{-3}}{5{,}73\cdot 10^{-2}} + 0{,}2\right) - 0{,}4 \times \left(\frac{3{,}15\cdot 10^{-3}}{5{,}73\cdot 10^{-2}} - 0{,}5\right)^2\right] 10^{-6} = 0{,}71\cdot 10^{-6},$$

где $c_p = \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{16{,}5 - 10{,}2}{2}\, 10^{-2} = 3{,}15\cdot 10^{-2}$ м;

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D} = (3{,}1 + 0{,}27)\cdot 10^{-2} - \frac{16{,}5^2\cdot 10^{-4}}{4\cdot 90\cdot 10^{-2}} = 2{,}62\cdot 10^{-2}\ \text{м};$$

$$a_p' = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p} = \left(23{,}6 - 16{,}5 - \frac{3{,}14\cdot 2{,}62}{6}\right)\cdot 10^{-2} = 5{,}73\cdot 10^{-2}\ \text{м}.$$

75. Удельная магнитная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями по (7-83)

$$\lambda_{mb} = 0{,}37\,\frac{b_m}{l_m'}\cdot 10^{-6} = 0{,}37\,\frac{10{,}2\cdot 10^{-2}}{37\cdot 10^{-2}} \times 10^{-6} = 0{,}102\cdot 10^{-6}.$$

76. Удельная магнитная проводимость для потока рассеяния

$$\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb} = (1{,}030 + 0{,}71 + 0{,}102)\cdot 10^{-6} = 1{,}842\cdot 10^{-6}.$$

77. Магнитное напряжение ярма статора, зазора и зубцов полюсного наконечника

$$F_{\delta zd} = F_\delta + F_{z1} + F_a + F_{z2}.$$

78. Поток рассеяния полюса по (7-80), Вб,

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{m\sigma}\, l_m' F_{\delta za} = 4\cdot 1{,}842\cdot 10^{-6} \times 37\cdot 10^{-2} F_{\delta za} = 2{,}74\cdot 10^{-6} F_{\delta za}.$$

79. Поток в сечении полюса у его основания, Вб,

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = 0{,}131\cdot 10^{-4} E_1 + 2{,}74\cdot 10^{-6} F_{\delta za}.$$

80. Индукция в полюсе по (7-84), Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l_m' b_m k_{c.p}} = \frac{0{,}131\cdot 10^{-4} E_1 + 2{,}74\cdot 10^{-6} F_{\delta za}}{37\cdot 10^{-2}\cdot 10{,}2\cdot 10^{-2}\cdot 0{,}95} = 0{,}366\cdot 10^{-3} E_1 + 0{,}766\cdot 10^{-4} F_{\delta za}.$$

81. Магнитное напряжение полюса по (7-79), А,

$$F_m = h_{mp} H_m = 17{,}7\cdot 10^{-2} H_m,$$

где $h_{mp} = h_m + h_p = (14{,}6 + 3{,}1)\cdot 10^{-2} = 17{,}7\cdot 10^{-2}$ м.

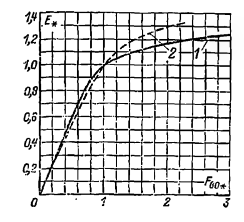


Рис. 7-45. Характеристика холостого хода.

1 — расчетная характеристика; 2 — нормальная характеристика.

82. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора по (7-86), А,

$$F_{\delta mj} = 250 B_m.$$

83. Индукция в ободе магнитного колеса (ярме ротора) по (7-88), Тл,

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2 l_j h_j k_{c.p}} = \frac{0{,}131\cdot 10^{-4} E_1 + 2{,}74\cdot 10^{-6} F_{\delta za}}{2\cdot 47\cdot 10^{-2}\cdot 4{,}5\cdot 10^{-2}\cdot 1} = 0{,}31\cdot 10^{-3} E_1 + 0{,}650\cdot 10^{-4} F_{\delta za}.$$

84. Магнитное напряжение в ободе магнитного колеса по (7-87)

$$F_j = L_j H_j = 6{,}5\cdot 10^{-2} H_j;$$

$$L_j = \frac{\pi (D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p} = \frac{\pi (90 - 2\cdot 0{,}27 - 2\cdot 17{,}7 - 4{,}5)\cdot 10^{-2}}{4\cdot 6} = 6{,}5\cdot 10^{-2}\ \text{м}.$$

85. Магнитное напряжение сердечника полюса, ярма ротора и стыка между полюсом и ярмом, А,

$$F_{mj} = F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

Таблица 7-17

Параметр	E_{1*} и Φ_*				
	0,5	1	1,1	1,2	1,3
E_1, В	1735	3470	3820	4160	4510
$\Phi = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1$, Вб	0,0227	0,0455	0,05	0,0545	0,059
$B_\delta = 2,48 \cdot 10^{-4} E_1$, Тл	0,43	0,86	0,946	1,04	1,12
$F_\delta = 0,73 E_1$, А	1270	2540	2790	3040	3300
$B_{z1} = 4,52 \cdot 10^{-4} E_1$, Тл	0,785	1,57	1,73	1,88	2,04
H_{z1}, А/м	243	5650	16 000	30 000	45 000
$F_{z1} = 7,4 \cdot 10^{-2} H_{z1}$, А	18,0	420	1180	2120	3330
$B_a = 3,55 \cdot 10^{-4} E_1$, Тл	0,615	1,23	1,36	1,48	1,6
ξ	0,63	0,48	0,4	0,32	0,29
H_a, А/м	154	810	1490	3370	6700
$F_a = 14,6 \cdot 10^{-2} \xi H_a$, А	14,2	56,5	87	157	285
$B_{z2} = 4,62 \cdot 10^{-4} E_1$, Тл	0,8	1,6	1,76	1,92	2,09
H_{z2}, А/м	405	4000	9800	17 000	26 000
$F_{z2} = 1,41 \cdot 10^{-2} H_{z2}$, А	5,7	50,65	138	240	367
$F_{\delta za} = F_\delta + F_{z1} + F_a + F_{z2}$, А	1307,9	3067,15	4195	5557	7282
$\Phi_\sigma = 2,74 \cdot 10^{-6} F_{\delta za}$, Вб	0,00359	0,00840	0,01145	0,0152	0,020
$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = 0,131 \cdot 10^{-4} E_1 + 2,74 \cdot 10^{-6} F_{\delta za}$	0,0263	0,0539	0,061	0,07	0,079
$B_m = 0,366 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,766 \cdot 10^{-4} F_{\delta za}$, Тл	0,735	1,5	1,7	1,95	2,2
H_m, А/м	350	1690	4430	13 600	30 000
$F_m = 17,7 \cdot 10^{-2} H_m$, А	62	300	785	2400	5300
$F_{\delta mj} = 250 B_m$, А	184	376	425	488	550
$B_j = 0,31 \cdot 10^{-3} E_1 + 0,650 \cdot 10^{-4} F_{\delta za}$	0,626	1,27	1,45	1,65	1,87
H_j, А/м	305	1490	1750	5250	16 200
$F_j = 6,5 \cdot 10^{-2} H_j$, А	19,9	97	114	342	1050
$F_{mj} = F_m + F_{\delta mj} + F_j$, А	265,9	773	1324	3250	6900
$F_{в0} = F_{\delta za} + F_m + F_{\delta mj} + F_j$, А	1574,0	3840,15	5519	8807	14 182
$F_{в0*}$	0,41	1	1,44	2,30	3,70
Φ_{m*}	0,58	1,19	1,36	1,54	1,75
$F_{\delta za*}$	0,34	0,8	1,09	1,45	1,9
F_{mj*}	0,069	0,201	0,343	0,84	1,8

Примечания: 1. При определении магнитного напряжения зубцов в тех случаях, когда $B_z > 1,8$ Тл ($E_{1*} = 1,2$, $E_{1*} = 1,3$), учитывалось ответвление потока в паз по коэффициентам:

для статора

$$k_{1n^1/_3} = \frac{t_{z1^1/_3}\, l_1}{b_{z1^1/_3}\, l_{ст1}\, k_c} - 1 = \frac{3,32 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2}}{2,07 \cdot 10^{-2} \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93} - 1 = 1,05;$$

для ротора

$$k_{2n^1/_3} = \frac{t_{z2^1/_3}\, l_p}{b_{z2^1/_3}\, l_p\, k_{c.p}} - 1 = \frac{2,62 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2}}{1,48 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95} - 1 = 0,85$$

2. При $B_m \geq 1,5$ Тл магнитное напряжение полюса определялось по трем сечениям.

86. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения на один полюс по (7-89)

$$F_{в0} = F_{\delta za} + F_{mj} = F_{\delta} + F_{z1} + F_a + F_{z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

Результаты расчета магнитной цепи сводим в табл. 7-17.

При переводе магнитных напряжений $F_{\delta za}$, F_{mj} и потока Φ_m в относительные единицы за базовые значения соответственно приняты МДС $F_{в0}$ и Φ при $E_{1*}=1$.

По табл. 7-17 на рис. 7-45 построена в относительных единицах характеристика холостого хода. На этом же рисунке приведена нормальная характеристика холостого хода.

Параметры обмотки статора для установившегося режима

87. Средняя длина витка обмотки статора

$$l_{ср1} = 2(l_1 + l_л) = 2(0,36 + 0,46) = 1,64 \text{ м}.$$

88. Длина лобовой части обмотки статора по (6-138)

$$l_л = \frac{\pi(D + h_{п1})\beta}{2p\sqrt{1+\left(\frac{b_{п1}+S_i}{t_1}\right)^2}} + h_{п1} + 2B_1 = \frac{\pi(0,9+0,074)\,0,8}{2\cdot 6\sqrt{1+\left(\frac{0,0125+0,0075}{0,034}\right)^2}} + 0,074 + 0,095 = 0,46 \text{ м}.$$

89. Активное сопротивление обмотки статора по (7-95)

$$r_{1(15)} = \frac{w_1 l_{ср1}}{57\cdot 10^6 q_{эф} a} = \frac{360\cdot 1,64}{57\cdot 10^6\cdot 12,42\cdot 10^{-6}\cdot 1} = 0,835 \text{ Ом при } \vartheta = 15°\,C;$$

$$r_{1(75)} = 1,24 r_{1(15)} = 1,24\cdot 0,835 = 1,03 \text{ Ом при } \vartheta = 75°\,C.$$

90. Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах по (7-96)

$$r_{1(75)*} = \frac{r_{1(75)}}{z_б} = \frac{1,03}{60,6} = 0,0170, \text{ где}$$

$$Z_б = \frac{U_{н.ф}}{I_{н.ф}} = \frac{3468}{57,1} = 60,6 \text{ Ом}.$$

91. Индуктивное сопротивление рассеяния по (7-97)

$$x_\sigma = 15,8\frac{f}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2\frac{l_\delta}{pq}(\lambda_{п.к} + \lambda_л + \lambda_д) = 15,8\frac{50}{100}\left(\frac{360}{100}\right)^2 \times \frac{0,34}{6\cdot 2,5}(2,22 + 0,825 + 0,442) = 8,15 \text{ Ом}.$$

92. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния по (7-98)

$$\lambda_{п.к} = \lambda_п + \lambda_к = 2 + 0,22 = 2,22.$$

Коэффициент магнитной проводимости между стенками паза по табл. 6-20

$$\lambda_п = \frac{h_2 - h_0}{3b_{п1}}k_\beta + \frac{h_1}{b_{п1}}k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{п1}} = \frac{(6,33-0,67)\cdot 10^{-2}}{3\cdot 1,25\cdot 10^{-2}}0,88 + \frac{0,785\cdot 10^{-2}}{1,25\cdot 10^{-2}} \times 0,84 + \frac{0,67\cdot 10^{-2}}{4\cdot 1,22\cdot 10^{-2}} = 2.$$

Размеры паза по рис. 6-38, *а* и 7-43: $h_2=6,33$ см; $b_{п1}=1,25$ см; $h_1=0,785$ см; $h_0=0,67$ см.

При $\beta=y_1/\tau_п=0,8$ по (6-151)

$$k'_\beta = \frac{1+3\beta}{4} = \frac{1+3\cdot 0,8}{4} = 0,84;$$

по (6-153)

$$k_\beta = (1 + 3k'_\beta)/4 = (1 + 3\cdot 0,84)/4 = 0,88.$$

Коэффициент магнитной проводимости по коронкам зубцов по (7-99)

$$\lambda_к = \left[\alpha\lambda'_к + \left(0,22 + 0,32\sqrt{\frac{t_1 - b_{п1}}{b_{п1}}}\right)\times(1-\alpha)\right]k'_\beta = \left[0,7\cdot 0,1 + \left(0,22 + 0,32 \times \sqrt{\frac{(3,14-1,25)\cdot 10^{-2}}{1,25\cdot 10^{-2}}}\right)(1-0,7)\right]\times 0,84 = 0,22;$$

при $\frac{b_{п1}}{\delta' k_\delta} = \frac{1,25\cdot 10^{-2}}{0,313\cdot 10^{-2}\cdot 1,35} = 2,95$ из рис. 7-25 $\lambda'_к = 0,1$.

93. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния по (6-154)

$$\lambda_л = 0,34\frac{q_1}{l_1}(l_л - 0,64\beta\tau) = 0,34 \times \frac{2,5}{34\cdot 10^{-2}}(46\cdot 10^{-2} - 0,64\cdot 0,8 \times 23,6\cdot 10^{-2}) = 0,825.$$

94. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния по (7-100)

$$\lambda_д = 0,03\frac{\tau\alpha_\delta}{\delta' k_\delta q_1} = 0,03 \times \frac{23,6\cdot 10^{-2}\cdot 0,66}{0,313\cdot 10^{-2}\cdot 1,35\cdot 2,5} = 0,442.$$

95. Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$$x_{\sigma*} = \frac{x_\sigma}{z_б} = \frac{8,15}{60,6} = 0,135.$$

96. Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря в относительных единицах по (7-102)

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad} F_{an}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} = \frac{0,87 \cdot 4250}{1,24 \cdot 2540} = 1,18;$$

$$F_{an} = 0,45m \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_{нф} = 0,45 \cdot 3 \times$$

$$\times \frac{360 \cdot 0,915}{6} 57,1 = 4250 \text{ А}$$

по (7-90): $k_{ad}=0,87$ из рис. 7-23. По характеристике холостого хода табл. 7-17 для $E_{1*}=1$ $E_{\delta 0}=2540$ А; для $E_*=0,5$

$$k_{\mu 0} = \frac{F_{в0}}{F_\delta} = \frac{1574}{1270} = 1,24.$$

97. Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря в относительных единицах по (7-103)

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq} F_{an}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} \frac{1+k_\delta}{2} =$$

$$= \frac{0,435 \cdot 4250}{1,24 \cdot 2540} \frac{1+1,35}{2} = 0,69;$$

$k_{aq} = 0,435$ по рис. 7-23.

98. Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах

$$x_{d*} = x_{\sigma*} + x_{ad*} = 0,135 + 1,18 = 1,315.$$

99. Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси в относительных единицах

$$x_{q*} = x_{\sigma*} + x_{aq*} = 0,135 + 0,69 = 0,825.$$

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения при нагрузке

100. По данным табл. 7-17 на рис. 7-46 построены частичные характеристики намагничивания, а на рис. 7-47 — зависимость $E_* = f\left(\frac{F_{\delta za}}{F_\delta}\right)$.

Из векторной диаграммы (рис. 7-48) по $I_{н.ф*}$, $U_{н.ф*}$, $\cos\varphi_н$ определяем $E_{\delta_*} = 1,07$.

Из рис. 7-47 по $E_{\delta*} = 1,07$ находим

$$\frac{F_{\delta za}}{F_\delta} = 1,33,$$ а затем по рис. 7-24 $\tilde{\varkappa}_d =$

$$= 0,93; \; \tilde{\varkappa}_q = 0,68 \text{ и } k = 0,0024.$$

101. Находим МДС

$$\frac{F'_{aq}}{\cos\psi} = \varkappa_q k_{aq} F_{an*} = 0,68 \cdot 0,435 \cdot 1,11 =$$

$$= 0,328,$$

где $F_{an*} = \frac{F_{an}}{F_{в.0}} = \frac{4250}{3840,15} = 1,11.$

По найденной МДС из характеристики $E_* = f(F_{\delta za_*})$ определяем ЭДС $\frac{E_{aq*}}{\cos\psi} = 0,45$, отложив которую на векторной диаграмме, получим направление, а затем и модуль $E_{rd*} = -\Phi_{rd*} = 1,03$.

Находим $\psi = 50°$, $\cos\psi = 0,64$; $\sin\psi = 0,77$.

Из характеристики $E_* = f(F_{\delta za*})$ по E_{rd*} находим $F_{rd*} = 0,95$.

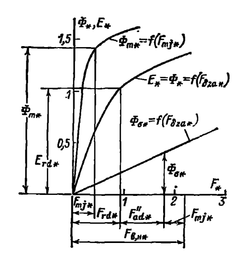


Рис. 7-46. Частичные характеристики намагничивания.

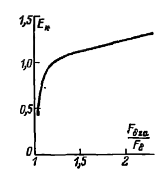


Рис. 7-47. Зависимость $E_* = f\left(\frac{F_{\delta za}}{F_\delta}\right)$.

102. Магнитодвижущая сила продольной реакции якоря

$$F''_{ad*} = \tilde{\varkappa}_d k_{ad} F_{an*} \sin\psi + \tilde{k} \frac{\tau}{\delta} F_{an*} \cos\psi =$$

$$= 0,93 \cdot 0,87 \cdot 1,11 \cdot 0,77 +$$

$$+ 0,0024 \frac{23,6 \cdot 10^{-2}}{0,27 \cdot 10^{-2}} 1,11 \cdot 0,64 = 0,84.$$

По сумме $F_{rd*} + F''_{ad*} = 0,95 + 0,84 = 1,79$ из характеристики $\Phi_\sigma = f(F_{\delta za})$ определяем $\Phi_{\sigma_*} = 0,4$. Поток полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*} = 1,03 + 0,4 = 1,43$.

Из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ по потоку $\Phi_{m*} = 1,43$ определяем $F_{mj*} = 0,39$.

103. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения в относительных единицах при номинальной нагрузке

$$F_{в,н*} = F_{rd*} + F'_{ad*} + F_{mj*} = 0,95 + 0,84 + 0,39 = 2,18.$$

104. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения

$$F_{в,н} = F_{в,н*} F_{в,б} = 2,18\cdot 3840,15 = 8350 \text{ А}.$$

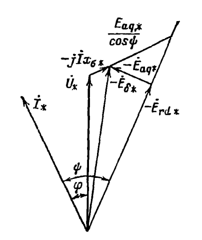


Рис. 7-48. Векторная диаграмма для номинальной нагрузки.

Обмотка возбуждения

Выбираем однорядную обмотку с лобовой частью в виде полуокружности. Изоляция класса нагревостойкости В.

105. Средняя длина витка обмотки возбуждения по (7-109)

$$l_{eср} = 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_e) = 2(35\cdot 10^{-2} - 2\cdot 1,5\cdot 10^{-2}) + \pi(10,2\cdot 10^{-2} + 2\cdot 0,15\cdot 10^{-2} + 1,4\cdot 10^{-2}) = 102\cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$\delta'' = 1,5\cdot 10^{-2} \text{ м};\ b_e \approx 0,06\tau = 0,06\cdot 23,6\cdot 10^{-2} \approx 1,4\cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Для питания обмотки возбуждения (из табл. 7-10) выбираем тиристорное возбудительное устройство ТВУ-65-320 ($U_{нс}$=65 В, $I_н$=320 А). Напряжение на кольцах с учетом переходного падения напряжения в щеточном контакте принимаем U_e=63 В.

106. Сечение проводников обмотки возбуждения (предварительное значение) по (7-107)

$$q_e = \frac{\rho_{130}\, 2pF'_{в,н}\, l_{eср}}{U_e} = \frac{1}{39\cdot 10^6} \times \frac{2\cdot 6\cdot 10\,000\cdot 1,02}{63} = 50\cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где $F'_{в,н} = 1,2F_{в,н} = 1,2\cdot 8350 = 10\,000$ А.

107. Ток возбуждения по (7-111)

$$I_{в,н} = q_e J_e = 50\cdot 10^{6}\cdot 5,2\cdot 10^{6} = 260 \text{ А}.$$

Принимаем J_e=5,2·10⁶ А/м².

108. Число витков обмотки возбуждения по (7-112)

$$w_e = \frac{F_{в,н}}{I_{в,н}} = \frac{8350}{260} = 32.$$

109. Меньший размер прямоугольного проводника обмотки по (7-114)

$$a_e = \frac{h_m - \delta_{к,п}}{w_e + 1} - \delta_п = \frac{14,6\cdot 10^{-2} - 1,4\cdot 10^{-2}}{32+1} - 0,03\cdot 10^{-2} = 0,37\cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Принимаем $\delta_{к,п} = 1,4\cdot 10^{-2}$ м, $\delta_п = 0,03\cdot 10^{-2}$ м.

По табл. П-29 выбираем проводник с размерами $a_e\times b_e$=3,75×14 мм (q_e=51,95·10⁻⁶ м²).

110. Расстояние между катушками соседних полюсов по (7-116)

$$x \approx \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_e = \frac{\pi(90\cdot 10^{-2} - 2\cdot 0,27\cdot 10^{-2} - 2\cdot 3,1\cdot 10^{-2} - 2\cdot 14,6\cdot 10^{-2})}{12} - 10,2\cdot 10^{-2} - 2\cdot 0,15\cdot 10^{-2} - 2\cdot 1,4\cdot 10^{-2} = 0,9\cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

111. Плотность тока в обмотке возбуждения (уточненное значение)

$$J_e = \frac{I_{в,н}}{q_e} = \frac{260}{51,95\cdot 10^{-6}} = 5,0\cdot 10^{6} \text{ А/м}.$$

112. Превышение температуры обмотки возбуждения по (7-119)

$$\Delta\vartheta_e = \frac{3\cdot 10^{-10}\left(2,8 + \frac{l_1}{\tau}\right) b_e J_e^2}{1,6 + \sqrt{v_p}} = \frac{3\cdot 10^{-10}\left(2,8 + \frac{36\cdot 10^{-2}}{23,6\cdot 10^{-2}}\right)\cdot 1,4\cdot 10^{-2}\cdot 5^2\cdot 10^{12}}{1,6 + \sqrt{23,5}} = 70^\circ\text{C} < 80^\circ\text{C};$$

$$v_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi 90\cdot 10^{-2}\cdot 500}{60} = 23,5 \text{ м/с}.$$

113. Уточненное значение высоты полюса

$$h_m = (a_e + \delta_п)(w_e + 1) + \delta_{к,п} = (0,375\cdot 10^{-2} + 0,03\cdot 10^{-2})(32+1) + 1,4\cdot 10^{-2} = 14,8\cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Так как расхождение с ранее выбранной высотой h_m=14,6·10⁻² м составляет

1,5%, то пересчет магнитного напряжения полюса не производим.

114. Активное сопротивление обмотки возбуждения по (7-120)

$$r_{\text{в}iso} = \rho_{iso} \frac{2pw_e l_{e\text{ср}}}{q_e} =$$

$$= \frac{1}{39\cdot 10^6} \frac{12\cdot 32\cdot 1,02}{51,95\cdot 10^{-6}} = 0,193 \text{ Ом};$$

$$r_{\text{в}75} = 0,193 \frac{39}{46} = 0,164 \text{ Ом}.$$

115. Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и $\vartheta = 130°$ С по (7-121)

$$U'_{e\text{н}} = I_{\text{в,н}} r_{\text{в}130} = 260\cdot 0,193 = 50,2 \text{ В}.$$

116. Коэффициент запаса возбуждения по (7-122)

$$k_e = \frac{U_{\text{п},e}}{U'_{e\text{н}} + \Delta U_{\text{щ}}} = \frac{65}{50,2 + 2} = 1,24.$$

Параметры и постоянные времени

117. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения по (7-123)

$$x_{e*} = 1,27 k_{ad} x_{ad*} \left(1 + \frac{4k_{\mu 0} F_{\delta 0} l'_m \Sigma\lambda}{\Phi_{\text{б}}}\right) =$$

$$= 1,27\cdot 0,87\cdot 1,18 \times$$

$$\times \left(1 + \frac{4\cdot 1,24\cdot 2540\cdot 37\cdot 10^{-2}\cdot 1,42\cdot 10^{-6}}{0,0455}\right) =$$

$$= 1,49;$$

$$\Sigma\lambda = \lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1,53} + \frac{\lambda_{m\text{в}}}{2,65} = 0,71\cdot 10^{-6} +$$

$$+ \frac{1,03\cdot 10^{-6}}{1,53} + \frac{0,102\cdot 10^{-6}}{2,65} = 1,42\cdot 10^{-6}.$$

118. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения по (7-124)

$$x_{\sigma e*} = x_{e*} - x_{ad*} = 1,49 - 1,18 = 0,31.$$

119. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по продольной оси по (7-125).

По отношению $\frac{t_2}{\tau} = \frac{2,65\cdot 10^{-2}}{23,6\cdot 10^{-2}} = 0,112$ при $N_c = 6$ из рис. 7-37 определяем $k_b = 0,49$; $1 + k_b = 1,49$; $1 - k_b = 0,51$.

Из рис. 7-36: $C_d = 0,95$; $C_q = 1,75$.

Тогда

$$\lambda_{\text{в}} = \left(0,785 - \frac{b_s}{2d_s}\right) + \frac{h_s}{b_s} =$$

$$= \left(0,785 - \frac{0,4\cdot 10^{-2}}{2\cdot 1,21\cdot 10^{-2}}\right) + \frac{0,2\cdot 10^{-2}}{0,4\cdot 10^{-2}} =$$

$$= 1,12;$$

$$\lambda_{\text{д,у}} = \frac{t_2}{12\delta' k_\delta} = \frac{2,65\cdot 10^{-2}}{12\cdot 0,313\cdot 10^{-2}\cdot 1,35} =$$

$$= 0,524;$$

$$\lambda_{Rd} = 0,19 \frac{\tau C_d}{N_c} = 0,19 \frac{23,6\cdot 10^{-2}\cdot 0,95}{6} =$$

$$= 0,71\cdot 10^{-2};$$

$$x_{kd*} = 7,9 \frac{F_{a\text{н}}}{\Phi_{\text{б}}} \frac{10^{-6}}{1 - k_b} \left[\frac{l_p}{N_c}(\lambda_{\text{в}} + \lambda_{\text{д,у}}) + \right.$$

$$\left. + \lambda_{Rd}\right] = 7,9 \frac{4250}{0,0455} \frac{10^{-6}}{0,51} \times$$

$$\times \left[\frac{35\cdot 10^{-2}}{6}(1,12 + 0,524) + 0,71\cdot 10^{-2}\right] =$$

$$= 0,148.$$

120. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по поперечной оси по (7-126)

$$x_{kq*} = 7,9 \frac{F_{a\text{н}}}{\Phi_{\text{б}}} \frac{10^{-6}}{1 + k_b} \left[\frac{l_p}{N_c}(\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{д,у}}) + \right.$$

$$\left. + \lambda_{Rq}\right] = 7,9 \frac{4250}{0,0455} \frac{10^{-6}}{1,49} \times$$

$$\times \left[\frac{35\cdot 10^{-2}}{6}(1,12 + 0,524) + 1,31\cdot 10^{-2}\right] =$$

$$= 0,054;$$

$$\lambda_{Rq} = 0,19 \frac{\tau C_q}{N_c} = 0,19 \frac{23,6\cdot 10^{-2}\cdot 1,75}{6} =$$

$$= 1,31\cdot 10^{-2}.$$

121. Активное сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75°$ С по (7-135)

$$r_{e*} = \frac{0,44}{10^8} \frac{F_{a\text{н}} k_{ad}^2 l_{e\text{ср}}}{\Phi_{\text{б}} f w_e q_e} =$$

$$= \frac{0,44}{10^8} \frac{4250\cdot 0,87^2\cdot 102\cdot 10^{-2}}{0,0455\cdot 50\cdot 32\cdot 51,95\cdot 10^{-6}} = 0,00384.$$

122. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси при $\vartheta = 75°$ С по (7-136)

$$r_{kd*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{a\text{н}}}{f\Phi_{\text{б}}} \frac{1}{1 - k_b}\left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{\text{к,з}} \tau C_d}{q_{\text{к,з}} N_c}\right) =$$

$$= \frac{2,16}{10^8} \frac{4250}{0,0455} \frac{1}{0,51} \frac{1}{50}\left(\frac{43\cdot 10^{-2}}{113\cdot 10^{-6}\cdot 6} + \right.$$

$$\left. + \frac{23,6\cdot 10^{-2}\cdot 0,95}{399,1\cdot 10^{-6}\cdot 6}\right) = 0,0575;$$

$$c_c = c_{\text{к,з}} = 1.$$

123. Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси при $\vartheta = 75°$ С по (7-137)

$$r_{kq*} = \frac{2,16}{10^8} \frac{F_{a\text{н}}}{f\Phi_{\text{б}}} \frac{1}{1 + k_b}\left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{\text{к,з}} \tau C_q}{q_{\text{к,з}} N_c}\right) =$$

$$= \frac{2,16}{10^8} \frac{4250}{50\cdot 0,0455} \frac{1}{1,49}\left(\frac{43\cdot 10^{-2}}{113\cdot 10^{-6}\cdot 6} + \right.$$

$$\left. + \frac{23,6\cdot 10^{-2}\cdot 1,75}{399,1\cdot 10^{-6}\cdot 6}\right) = 0,0218.$$

Масса активных материалов

124. Масса зубцов статора по (7-147)

$$m_{z1} = 7800 l_{ст1} k_c h_{п1} b_{z^1/_2} Z_1 =$$
$$= 7800 \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93 \cdot 7,4 \cdot 10^{-2} \cdot 2,17 \times$$
$$\times 10^{-2} \cdot 90 = 315 \text{ кг},$$

где
$$b_{z^1/_2} = \frac{\pi(D + h_{п1})}{Z_1} - b_{п1} =$$
$$= \frac{(90 \cdot 10^{-2} + 7,4 \cdot 10^{-2})}{90} - 1,25 \cdot 10^{-2} =$$
$$= 2,17 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

125. Масса ярма статора по (7-148)

$$m_{a1} = 7800 l_{ст1} k_c \pi (D_a - h_a) h_a =$$
$$= 7800 \cdot 30,1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,93\pi (118 \cdot 10^{-2} -$$
$$- 6,6 \cdot 10^{-2}) \cdot 6,6 \cdot 10^{-2} = 505 \text{ кг}.$$

126. Масса меди обмотки статора по (7-149)

$$m_{м1} = 8900 q_{эф} u_п Z_1 l_{ср1}/2 =$$
$$= 8900 \cdot 12,42 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 90 \cdot 82 \cdot 10^{-2} = 196 \text{ кг}.$$

127. Масса меди обмотки возбуждения по (7-150)

$$m_{м,в} = 8900 q_e l_{e\ ср} 2pw_e =$$
$$= 8900 \cdot 51,95 \cdot 10^{-6} \cdot 102 \cdot 10^{-2} \cdot 12 \cdot 32 = 181 \text{ кг}.$$

128. Масса меди стержней пусковой обмотки по (7-151),

$$m_{м,с} = 8900 q_c 2pN_c l_c =$$
$$= 8900 \cdot 113,1 \cdot 10^{-6} \cdot 12 \cdot 6 \cdot 43 \cdot 10^{-2} = 31 \text{ кг}.$$

129. Масса меди короткозамыкающих колец по (7-152)

$$m_{м,к,з} = 8900 q_{к,з} (D - 2\delta - 2h_s - 2d_s) 2\pi =$$
$$= 8900 \cdot 399,1 \cdot 10^{-6} (90 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} -$$
$$- 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 1,21 \cdot 10^{-2}) \cdot 2\pi = 19,3 \text{ кг}.$$

130. Масса стали полюсов по (7-153)

$$m_m = 7800 l'_m k_{с.р} 2p (h_m b_m + 0,8 h_p b_p) =$$
$$= 7800 \cdot 37 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 \cdot 12 (14,9 \cdot 10^{-2} \cdot 10,2 \times$$
$$\times 10^{-2} + 0,8 \cdot 3,1 \cdot 10^{-2} \cdot 16,5 \cdot 10^{-2}) = 635 \text{ кг}.$$

131. Масса стали обода ротора по (7-154)

$$m_j = 7800 l_j \pi (D - 2\delta - 2h_{m.p} - h_j) h_j =$$
$$= 7800 \cdot 47 \cdot 10^{-2} \pi (90 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 0,27 \cdot 10^{-2} -$$
$$- 2 \cdot 17,7 \cdot 10^{-2} - 4,5 \cdot 10^{-2}) \cdot 4,5 \cdot 10^{-2} = 254 \text{ кг}.$$

132. Полная масса меди по (7-155)

$$m_м = m_{м1} + m_{м,в} + m_{м,с} + m_{м,к,з} =$$
$$= 196 + 181 + 31 + 19,3 = 427,3 \text{ кг}.$$

133. Полная масса активной стали по (7-156)

$$m_{ст} = m_{z1} + m_{a1} + m_m + m_j =$$
$$= 315 + 505 + 635 + 254 = 1709 \text{ кг}.$$

Потери и КПД

134. Основные электрические потери в обмотке статора по (7-159)

$$P_{э1} = m I^2_{н,ф} r_{1(75)} \cdot 10^{-3} =$$
$$= 3 \cdot 57,1^2 \cdot 1,03 \cdot 10^{-3} = 10,1 \text{ кВт}.$$

135. Потери на возбуждение по (7-161)

$$P_в = \left(I^2_{в,н} r_{в75} + 2\Delta U_щ I_{в,н}\right) \cdot 10^{-3} =$$
$$= (260^2 \cdot 0,164 + 2 \cdot 260) \cdot 10^{-3} = 11,9 \text{ кВт}.$$

136. Магнитные потери в ярме статора по (7-162)

$$P_{a1} = k_{да} p_{1/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{-3} =$$
$$= 1,3 \cdot 1,56 \cdot 1,23^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 505 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 1,55 \text{ кВт}.$$

137. Магнитные потери в зубцах статора по (7-163)

$$P_{z1} = k_{дz} p_{1/50} B^2_{z1/3} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{z1} \cdot 10^{-3} =$$
$$= 1,7 \cdot 1,56 \cdot 1,57^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 315 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 2,06 \text{ кВт}.$$

138. Механические потери по (7-164)

$$p_{мех} = 3,68p \left(\frac{v_p}{40}\right)^3 \sqrt{l_1} =$$
$$= 3,68 \cdot 6 \left(\frac{23,6}{40}\right)^3 \sqrt{0,36} = 2,72 \text{ кВт};$$
$$v_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi 0,9 \cdot 500}{60} = 23,6 \text{ м/с}.$$

139. Поверхностные потери в полюсных наконечниках по (7-165)

$$P_{пов} = 0,5 \cdot 2p\alpha\tau l_1 k_0 \left(\frac{Z_1 n}{10\,000}\right)^{1,5} (B_0 t_1 \cdot 10^3)^2 \times$$
$$\times 10^{-3} = 0,5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 0,7 \cdot 23,6 \cdot 10^{-2} \cdot 36 \cdot 10^{-2} \times$$
$$\times 6 \left(\frac{90 \cdot 500}{10\,000}\right)^{1,5} (0,219 \cdot 3,14 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3)^2 \times$$
$$\times 10^{-3} = 0,96 \text{ кВт};$$
$$B_0 = B_{\delta 0} (k_{\delta 1} - 1) = 0,86 (1,25 - 1) =$$
$$= 0,219 \text{ Тл}.$$

140. Добавочные потери при нагрузке

$$P_{доб} = 0,005 P_{1н} = 0,005 \cdot 535 = 2,68 \text{ кВт};$$
$$P_{1н} = \sqrt{3} U_н I_{н.ф} \cos \varphi_н 10^{-3} =$$
$$= \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 57,1 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3} = 535 \text{ кВт}.$$

141. Общие потери при номинальной нагрузке по (7-166)

$$\Sigma P = P_{э1} + P_в + P_{a1} + P_{z1} + P_{мех} +$$
$$+ P_{пов} + P_{доб} = 10,1 + 11,9 + 1,55 +$$
$$+ 2,06 + 2,72 + 0,96 + 2,68 = 31,97 \text{ кВт}.$$

142. Коэффициент полезного действия по (7-168)

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_{1н}} = 1 - \frac{31,97}{535} = 0,94.$$

Превышение температуры обмотки статора

143. Удельный тепловой поток на 1 м² внутренней поверхности статора по (5-88)

$$q_c = \frac{\left(P_{э1}\frac{l_1}{l_{ср1}/2} + P_{доб} + P_{a1} + P_{z1}\right)\cdot 10^3}{\pi D l_i} =$$

$$= \frac{10\,100\frac{0,36}{0,82} + 2680 + 1550 + 2060}{\pi\cdot 0,9\cdot 0,36} =$$

$$= 10\,600 \text{ Вт/м}^2.$$

144. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха по (5-89)

$$\Delta\vartheta_{пов.с} = \frac{q_c}{\alpha(1 + 0,1v_p)} =$$

$$= \frac{10\,600}{80(1 + 0,1\cdot 23,6)} = 39,5°\text{C}.$$

145. Плотность теплового потока с внешней поверхности лобовых частей по (5-81)

$$q_л = \frac{AJ_1}{\gamma_\vartheta}\frac{t_1}{П_1} =$$

$$= \frac{440\cdot 10^2\cdot 4,6\cdot 10^6}{46\cdot 10^6}\frac{3,14\cdot 10^{-2}}{16,26\cdot 10^{-2}} =$$

$$= 860 \text{ Вт/м}^2$$

[удельная проводимость меди при 75° C $\gamma_\vartheta = 46\cdot 10^6$ См/м; периметр паза (без учета клина) по рис. 7-43 $П_1 = 16,26\cdot 10^{-2}$ м].

146. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха по (5-82)

$$\Delta\vartheta_л = \frac{q_л}{13,3(1 + 0,07v_p)} =$$

$$= \frac{860}{13,3(1 + 0,07\cdot 23,6)} = 24,4° \text{C}.$$

147. Перепад температуры в пазовой изоляции обмотки статора (см. п. 30)

$$\Delta\vartheta_{из} = 11° \text{C}.$$

148. Среднее превышение температуры обмотки статора по (5-83)

$$\Delta\vartheta_{об.с} =$$

$$= \frac{(\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов.с})l_1 + (\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_л)\, l_л}{l_{ср1}/2} =$$

$$= \frac{(11 + 39,5)\,0,36 + (11 + 24,4)\,0,46}{0,82} =$$

$$= 42,1° \text{C}.$$

Характеристика двигателя

149. Статическая перегружаемость по (7-171)

$$\frac{M_m}{M_н} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}\cos\varphi_н}k_{р.с} = \frac{2,58}{1,315\cdot 0,9}1,02 =$$

$$= 2,23.$$

При МДС обмотки возбуждения $F_{в.н*} = 2,2$ по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода находим $E'_{0*} = 2,58$.

По рис. 7-42 при $\frac{x_{d*} - x_{q*}}{E'_{0*}\, x_{q*}} =$

$= \frac{1,315 - 0,825}{2,58\cdot 0,825} = 0,23$ находим $k_{р.с} = 1,02$,

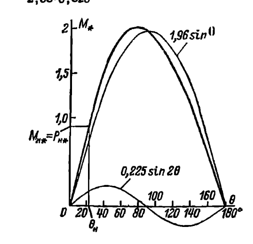


Рис. 7-49. Угловая характеристика.

150. Угловая характеристика $M_* = f(\theta)$ по (7-169)

$$M_* = \frac{E'_{1*}}{x_{d*}}\sin\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}}\right)\sin 2\theta =$$

$$= \frac{2,58}{1,315}\sin\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{0,825} - \frac{1}{1,315}\right)\sin 2\theta =$$

$$= 1,96\sin\theta + 0,225\sin 2\theta.$$

Построенная по этому уравнению характеристика дана на рис. 7-49.

151. U-образные характеристики $I_* = f(I_{в*})$ построены по векторным диаграммам для трех значений мощности: $P_{1*} = 0,9$, 0,5 и 0,2 (за базовое значение мощности принята мощность $S_н = mU_{н.ф}I_{н.ф}\cdot 10^{-3} = 3\times 3468\cdot 57,1\cdot 10^{-3} = 593$ кВ·А; за базовое значение тока принят номинальный ток $I_{н.ф} = 57,1$ А).

При $P_{1н}$ векторные диаграммы для трех значений тока $I_{(1)*} = 0,95$; $I_{(2)*} = 0,9$ и $I_{(3)*} = 0,93$ представлены на рис. 7-50.

Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм и определения тока возбуждения, сведены в табл. 7-18 (в относительных единицах).

Ток возбуждения $I_{в*}$, соответствующий номинальному току якоря при $P_{1н}$, был определен раньше (по рис. 7-48). Для других

Таблица 7-18

I_*	$E_{\delta *}$	$\frac{F_{\delta za}}{F_\delta}$	$\tilde{k}$	$\tilde{\varkappa}_d$	$\tilde{\varkappa}_q$	$\bar{\varkappa}_q k_{aq} F_{a*}$	$\frac{E_{aq*}}{\cos\psi}$	E_{rd*}	F_{rd*}	ψ	F''_{ad*}	$F_{rd*} + F_{cd*}$	$\Phi_{\sigma*}$	$\Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*}$	F_{ml*}	$F_{в*} = I_{в*}$
0,95	1,85	1,3	0,0024	0,935	0,7	0,31	0,45	1	0,82	43°	0,585	1,405	0,32	1,32	0,3	1,75
0,9	1,02	1,25	0,0022	0,94	0,74	0,31	0,45	0,93	0,72	30	0,57	1,29	0,29	1,22	0,22	1,44
0,93	0,98	1,2	0,0021	0,945	0,76	0,328	0,48	0,86	0,64	23	0,5	1,14	0,26	1,12	0,18	1,32

Таблица 7-19

P_{1*}	P_1, кВт	I_{1*}	I_1, А	$\cos\varphi = \frac{P_1}{mU_{н.ф} I_1}$	$P_{э1}$, кВт	$P_{доб}$, кВт	ΣP, кВт	$\eta = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1}$	$P_2 = P_1 - \Sigma P$, кВт	$M = 9550 \frac{P_2}{n_н}$, Н·м
0,9	535	1	57,1	0,9	10,2	2,7	32,3	0,939	502,7	9600
0,5	297	0,82	47	0,61	6,85	1,8	28,05	0,905	278,95	5130
0,2	119	0,7	40	0,285	4,9	1,32	25,62	0,785	93,38	1780

значений мощности U-образные характеристики строятся аналогично. Характеристики приведены на рис. 7-51.

152. Рабочие характеристики I, P_1, M, $\cos\varphi$, $\eta=f(P_2)$ при $I_в=I_{в.н}$ даны на рис. 7-52.

Из рис. 7-51 при $I_{в,н*}=2,18$ находим токи якоря: для $P_{1н*}=0,9$ (535 кВт) ток $I_*=1$ (57,1 А), для $P_{1*}=0,5$ (297 кВт) ток $I_*=0,82$ (47 А) и для $P_{1*}=0,2$ (119 кВт) ток $I_*=0,7$ (40 А). Расчет рабочих характеристик приведен в табл. 7-19. При расчете потерь ΣP пересчитываются электрические потери в обмотке статора и добавочные потери (пропорционально I^2). Остальные потери принимаются неизменными.

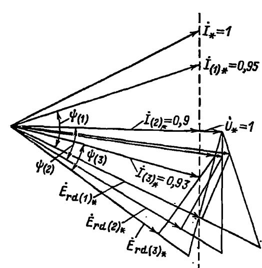


Рис. 7-50. Векторные диаграммы (к построению U-образных характеристик).

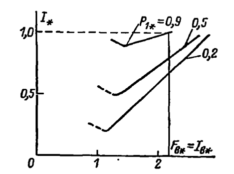


Рис. 7-51. U-образные характеристики.

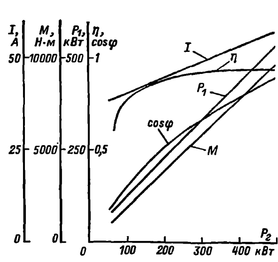


Рис. 7-52. Рабочие характеристики двигателя при $I_{в,н}=\text{const}$.

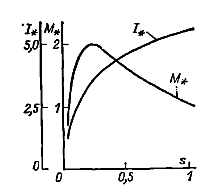


Рис. 7-53. Пусковые характеристики.

153. Пусковые характеристики. Ранее для пусковой обмотки были выбраны круглые медные стержни. Проведенный расчет пусковых характеристик показал, что в этом случае получается низкий пусковой момент ($M_{п*}=0,61$). В целях повышения пускового момента заменяем четыре медных стержня из шести на латунные того же размера. Проведем пересчет активных сопротивлений пусковой клетки. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси по (7-136)

$$r_{kd*}=\frac{2,16\,F_{ап}}{10^8\,f\Phi_б}\,\frac{1}{1-k_b}\times$$

$$\times\left[\frac{c_c'\,c_c''\,l_c}{\left(c_c''N_c'+c_c'N_c''\right)q_c}+\frac{c_{к,з}\,\tau C_d}{q_{к,з}\,N_c}\right]=$$

$$=\frac{2,16}{10^8}\,\frac{4250}{50\cdot0,0455}\,\frac{1}{0,51}\left[\frac{4\cdot43\cdot10^{-2}}{(4\cdot2+4)\cdot113\cdot10^{-6}}+\right.$$

$$\left.+\frac{23,6\cdot10^{-2}\cdot0,95}{399,1\cdot10^{-6}\cdot6}\right]=0,109;$$

$$c_c'=1;\quad c_c''=4.$$

Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси по (7-137)

$$r_{kq*}=\frac{2,16\,F_{ап}}{10^8\,f\Phi_б}\,\frac{1}{1+k_b}\times$$

$$\times\left[\frac{c_c'\,c_c''\,l_c}{\left(c_c''N_c'+c_c'N_c''\right)q_c}+\frac{c_{к,з}\,\tau C_q}{q_{к,з}\,N_c}\right]=$$

$$=\frac{2,16}{10^8}\,\frac{4250}{50\cdot0,0455}\,\frac{1}{1,49}\,\frac{4\cdot43\cdot10^{-2}}{(4\cdot2+4)\cdot113\cdot10^{-6}}+$$

$$+\frac{23,6\cdot10^{-2}\cdot1,75}{399,1\cdot10^{-6}\cdot6}=0,0394.$$

Параметры (в относительных единицах), необходимые для расчета пусковых характеристик:

Параметр	Скольжение				
	$s=1$	$s=0{,}5$	$s=0{,}20$	$s=0{,}1$	$s=0{,}05$
$\underline{Y}_{es}=\dfrac{1}{r'_e/s+jx_{\sigma e}}=\dfrac{r'_e/s-jx_{\sigma e}}{(r'_e/s)^2+x_{\sigma e}^2}$	0,405—j 3,11	0,77—j 3	1,46—j 2,26	1,55—j 1,2	1,08—j 0,42
$\underline{Y}_{kds}=\dfrac{1}{r_{kd}/s+jx_{kd}}=\dfrac{r_{kd}/s-jx_{kd}}{(r_{kd}/s)^2+x_{kd}^2}$	3,25—j 4,4	3,43—j 2,34	1,72—j 0,47	0,91—j 0,123	0,46— —j 0,0314
$\underline{Y}'_{ds}=\dfrac{1}{jx_{ad}}+\underline{Y}_{es}+\underline{Y}_{kds}$	3,655—j 8,36	4,2—j 6,19	3,18—j 3.58	2,46—j 2,173	1,54—j 1,3
$\underline{Z}'_{ds}=1/\underline{Y}'_{ds}$	0,044+ +j 0,1005	0,0755+ +j 0,111	0,139+ +j 0,157	0.23+j 0.202	0,385+ +j 0,323
$\underline{Z}_{ds}=jx_\sigma+\underline{Z}'_{ds}$	0,044+ +j 0,235	0,0755+ +j 0,246	0,139+ +j 0,292	0,23+j 0,377	0,385+ +j 0,458
$1/\underline{Z}_{ds}$	0,835—j 4,3	1,2—j 3,8	1,40—j 2,86	1,43—j 2,04	1,1—j 1,28
$\underline{Y}_{kqs}=\dfrac{1}{r_{kq}/s+jx_{kq}}=\dfrac{r_{kq}/s-jx_{kq}}{(r_{kq}/s)^2+x_{kq}^2}$	8,9—j 12,2	8,65—j 5,91	4,7—j 1,29	2,5—j 0,340	1,25—j 0.086
$\underline{Y}'_{qs}=\dfrac{1}{jx_{aq}}+\underline{Y}_{kqs}$	8,9—j 13,65	8,65—j 7,36	4,7—j 2,74	2.5—j 1,79	1,25—j 1.536
$\underline{Z}'_{qs}=1/\underline{Y}'_{qs}$	0,0338+ +j 0,052	0,067+ +j 0,057	0,159+ +j 0,093	0,265+ +j 0,189	0,32+ +j 0,392
$\underline{Z}_{qs}=jx_\sigma+\underline{Z}'_{qs}$	0,0338+ +j 0,187	0,067+ +j 0,192	0,159+ +j 0,228	0,265+ +j 0,324	0,32+ +j 0,527
$1/\underline{Z}_{qs}$	1,02—j 5,4	1,74—j 4,78	2,17—j 3	1,56—j 1,85	0,9—j 1,39
$\dot{I}'=\left(\dfrac{1}{\underline{Z}_{qs}}+\dfrac{1}{\underline{Z}_{ds}}\right)\Big/2=I'_a-jI'_p$	0,93—j 4.85	1.47—j 4,29	1.78—j 2.93	1.495—j 1.94	1,0—j 1,33
$\dot{I}''=\left(\dfrac{1}{\underline{Z}_{qs}}-\dfrac{1}{\underline{Z}_{ds}}\right)\Big/2=I''_a-jI''_p$	0,093— —j 0,55	0,27—j 0,49	0,35—j 0,07	0,07— —j 0,095	—0,1— —j 0,055
I'	4,95	4,54	3,43	2,44	1,66
I''	0,56	0,55	0,356	0,118	0,112
I	5,51	4,56	3.44	2,44	1,66
$M=I'_a/\cos\varphi_н$	1,035	1,63	1,98	1,66	1,11

$r'_{в*} = 10 r_{в*} \approx 0,04$; $x_{\sigma c*} = 0,31$;
$x_{kd*} = 0,148$; $x_{kq*} = 0,054$; $r_{kd*} = 0,109$;
$r_{kq*} = 0,0394$; $x_{\sigma*} = 0,135$; $x_{ad*} = 1,18$;
$x_{aq*} = 0,69$.

Расчет пусковых характеристик сведен в табл. 7-20. По данным этой таблицы на рис. 7-53 построены характеристики.

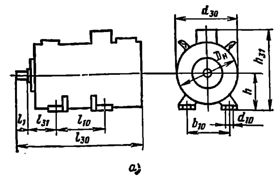
Начальный пусковой момент $M_{п*} = 1,035$.
Начальный пусковой ток $I_{п*} = 5,51$.

Глава восьмая

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Разработка конструкции электрической машины постоянного тока должна быть основана на существующих стандартах на установочные размеры, требованиях ГОСТ и рекомендациях МЭК.



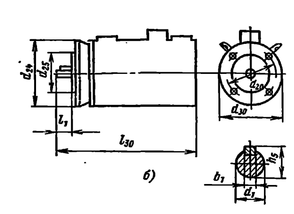


Рис. 8-1. Установочные размеры машин постоянного тока.
а — исполнение IM1001; *б* — исполнение IM3101.

Основная идея этих рекомендаций состоит в следующем.

Принята единая шкала номинальных высот оси вращения машин. При этом за высоту оси вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины (рис. 8-1).

Установочные размеры b_{10}; l_{10}; l_{31}; d_{10} однозначно увязаны с высотой оси вращения h, но не определяются мощностью машины.

Для каждой высоты оси вращения приняты три значения размера l_{10}, которым соответствуют три обозначения длины станины: S — для коротких, M — для средних и L — для длинных машин. Обычно электромашиностроительные заводы ограничиваются выбором только двух длин из предложенных МЭК трех значений.

Установочные размеры электрических машин приведены в табл. П-39 и П-40. Здесь приняты следующие обозначения размеров: h — высота от нижней опорной поверхности лап до оси машины; b_{10} — расстояние между отверстиями под болты в лапах (торцевой вид); l_{10} — расстояние от оси отверстия в лапе машины до упора (заплечика) свободного конца вала; d_1 — диаметр основного свободного конца вала; l_1 — длина свободного конца вала; d_{10} — диаметр отверстий под болты в лапах машины. Обозначения размеров указаны согласно ГОСТ 4541-70.

Размеры l_1 и d_1 свободного конца вала не связывают с высотой оси вращения, а выбирают в зависимости от наибольшего длительного вращающего момента электродвигателя согласно табл. П-42; размеры шпонки и шпоночных канавок связаны размерами l_1 и d_1.

Диаметры крепительных фланцев, регламентируемые МЭК, приведены в табл. П-41. Обозначения размеров приведены на рис. 8-1, *б*.

Машины общего назначения проектируют и выпускают заводами в виде серий, т. е. соразмерного ряда машин с конструктивным подобием и с закономерным нарастанием мощ-

Таблица 8-1

Мощности электродвигателей общего применения (степень защиты IP22)

Габарит	$U_н$ = 110 В					$U_н$ = 220 В					$U_н$ = 400 В		
	Мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин												
	600	750	1000	1500	3000	600	750	1000	1500	3000	750	1000	1500
11	—	—	0,13	0,30	0,7	—	—	0,13	0,3	0,7	—	—	—
										0,1	—	—	—
12	—	—	0,20	0,45	1,0	—	—	0,2	0,45	1,5	—	—	—
21	—	0,2	0,30	0,70	1,5	—	0,2	0,3	0,7	2,2	—	—	—
22	—	0,3	0,45	1,00	2,2	—	0,3	0,45	1,0	3,2	—	—	—
31	—	0,45	0,70	1,50	3,2	—	0,45	0,7	1,5	4,5	—	—	—
32	—	0,7	1,00	2,20	4,5	—	0,7	1,0	2,2	6,0	—	—	—
41	—	1,0	1,50	3,20	6,0	—	1,0	1,5	3,2	8,0	—	—	—
42	—	1,5	2,20	4,50	8,0	—	1,5	2,2	4,5	11,0	—	—	—
51	—	2,2	3,20	6,00	—	—	2,2	3,2	6,0	14,0	—	—	—
52	—	3,2	4,50	8,00	—	—	3,2	4,5	8,0	19,0	—	—	—
61	—	4,5	6,0	11,0	—	—	4,5	6,0	11,0	25,0	—	—	—
62	—	6,0	8,0	14,0	—	—	6,0	8,0	14,0	32,0	—	—	—
71	—	8,0	11,0	19,0	—	—	8,0	11,0	19,0	42,0	—	—	—
72	—	11,0	14,0	25,0	—	—	11,0	14,0	25,0	—	—	—	—
81	—	14,0	19,0	32,0	—	—	14,0	19,0	32,0	—	—	19	32
82	—	19,0	25,0	—	—	—	19,0	25,0	42,0	—	—	25	42
91	19,0	25,0	32,0	—	—	19,0	25,0	32,0	55,0	—	22	32	55
92	25,0	32,0	—	—	—	25,0	32,0	42,0	75,0	—	32	42	75
101	32,0	42,0	55,0	—	—	32,0	42,0	55,0	100,0	—	42	55	100
102	42,0	55,0	—	—	—	42,0	55,0	75,0	125,0	—	55	75	125
111	55,0	—	—	—	—	55,0	75,0	100,0	160,0	—	75	95	160
112	—	—	—	—	—	70,0	85,0	125,0	200,0	—	85	125	180

ности и геометрических размеров. В настоящее время наряду с единой серией П осваивают выпуск машин новой серии 2П, которая нормализована рекомендациями МЭК.

Номенклатура машин серии П подразделяется на три группы: машины мощностью от 0,3 до 200 кВт (1—11-й габариты); машины мощностью 200—1400 кВт (12—17-й га-

Таблица 8-2

Мощности генераторов общего назначения со смешанным возбуждением (степень защиты IP22)

Габарит	$U_н$ = 115 В			$U_н$ = 230 В			$U_н$ = 460 В	
	Мощность, кВт, при частоте вращения, об/мин							
	980	1450	2850	980	1450	2850	980	1450
21	—	0,37	1,25	—	0,37	1,25	—	—
22	—	0,6	1,6	—	0,6	1,6	—	—
31	—	1,0	2,6	—	1,0	2,6	—	—
32	—	1,5	3,8	—	1,5	3,8	—	—
41	—	2,7	6,2	—	2,7	6,2	—	—
42	—	3,2	7,2	—	3,2	7,2	—	—
51	—	5,0	11,0	—	5,0	11,0	—	—
52	—	6,5	14,0	—	6,5	14,0	—	—
61	—	9,0	—	—	9,0	18,0	—	—
62	—	11,5	—	—	11,5	25,0	—	—
71	—	16,0	—	—	16,0	—	—	—
72	—	21,0	—	—	21,0	—	—	—
81	19	27,0	—	19	27,0	—	—	27
82	25	35,0	—	25	35,0	—	25	35
91	32	50,0	—	32	50,0	—	32	50
92	42	—	—	42	70,0	—	42	65
101	55	85	—	55	90,0	—	55	90
102	70	—	—	70	110,0	—	65	110
111	90	—	—	90	150,0	—	90	145
112	—	—	—	115	190,0	—	110	170

Таблица 8-3

Показатели, определяющие подсерии

Показатели	Диапазон мощностей, кВт		
	0,37—1,1	1,5—30	37—200
Число полюсов	2	4	4
Класс нагревостойкости изоляции	B	B	F
Тип пазов якоря	Овальный	Овальный	Прямоугольный
Высота оси вращения, мм	90; 100	132; 160; 180; 200	225; 250; 280; 315
Предельное отношение активной длины якоря к его диаметру	1,25	1,15	1,0

бариты); машины мощностью свыше 1400 кВт (18—26-й габариты).

Габарит машины определяется диаметром якоря, который нормализован. Для каждого габарита имеются две длины сердечника. Исполнение электродвигателей единой серии П от 1-го до 11-го габарита по степени защиты IP22, по способу охлаждения IC01 или IC05. Возбуждение смешанное.

Мощности электродвигателей и генераторов общего применения в зависимости от типоразмера и частоты вращения приведены в табл. 8-1 и 8-2.

На рис. 8-2 дан чертеж электрической машины серии П, являющейся типичной для этой серии.

С целью обеспечения строгого геометрического подобия узлов и деталей машин и создания соразмерного ряда вся серия 2П подразделяется на ряд подсерий. В частности, в диапазоне номинальных мощностей от 0,37 до 200 кВт первая подсерия охватывает диапазон мощностей от 0,37 до 1,1 кВт, вторая — от 1,5 до 30 кВт, третья — от 37 до 200 кВт. Некоторые показатели, характеризующие указанные подсерии, приведены в табл. 8-3.

Электродвигатели серии 2П имеют следующие степени защиты (по ГОСТ 17494-72):

IP22 — с самовентиляцией (типа 2ПА); с независимой вентиляцией от постороннего вентилятора (типа 2ПН);

IP44 — закрытое исполнение с естественным охлаждением (типа 2ПВ) и закрытое исполнение с наружным обдувом от постороннего вентилятора (типа 2ПО).

Таблица 8-4

Номинальные значения электродвигателей типа 2ПА (род защиты IP22, изоляция класса нагревостойкости B, напряжение 110, 220, 440 В)

P, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин									
	3000		2200		1500		1000		750	
	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения
0,37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,75	—	—	—	—	—	—	—	—	112M	3000
1,1	—	—	—	—	—	—	112M	3000	112	3000
1,5	—	—	—	—	—	—	112	3000	132M	3000
2,2	—	—	—	—	112M	3500	132M	3000	132	3000
3,0	—	—	112M	3500	112	3500	132	3000	160	3000
4,0	112M	3500	112	3500	132M	3500	160M	3000	180M	3000
5,5	112	3500	132M	3500	132M	3500	160	3000	180	3000
7,5	132M	3500	132	3500	160M	3500	180M	3000	200	2500
11,0	132	3500	160M	3500	160	3500	180	3000	200	2500
15,0	160M	3500	160	3500	180M	3300	200M	3000	—	—
18,5	160	3500	180	3300	180	3300	200	3000	—	—

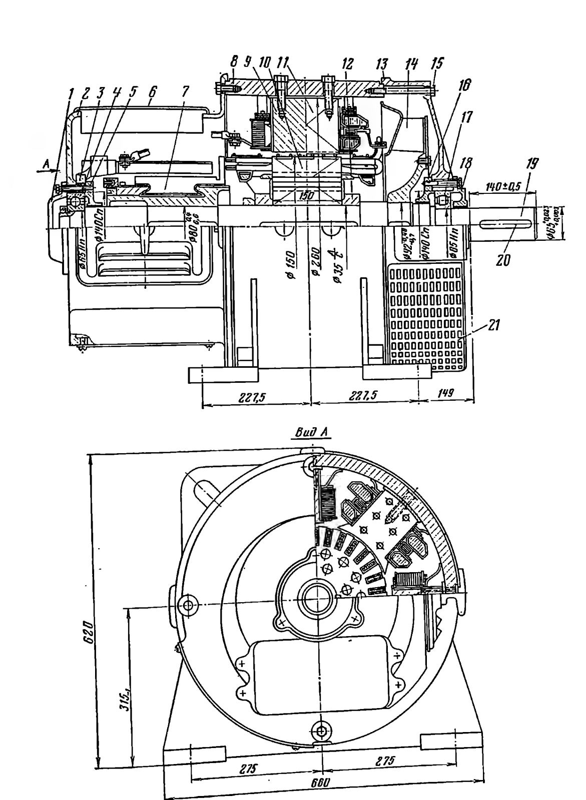


Рис. 8-2. Машина постоянного тока типа П-92.

1 — крышка подшипника; *2* — передний щит; *3* — траверса; *4* — шарикоподшипник 70-313; *5* — крышка подшипника; *6* — крышка подшипникового щита; *7* — коллектор; *8* — станина; *9* — добавочный полюс; *10* — якорь; *11* — главный полюс; *12* — шайба на валу; *13* — задний щит; *14* — вентилятор; *15* — болт М6; *16* — крышка подшипника; *17* — роликоподшипник 2313; *18* — крышка подшипника; *19* — вал; *20* — шпонка 16×10×90 мм; *21* — жалюзи.

Таблица 8-5

Номинальные мощности электродвигателей типа 2ПБ (род защиты IP44, изоляция класса нагревостойкости F, напряжения 110, 220, 440 В)

P, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин									
	3000		2200		1500		1000		750	
	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения	Габарит	Максимальная частота вращения
0,37	—	—	—	—	—	—	—	—	112M	3000
0,55	—	—	—	—	—	—	112M	3000	112	3000
0,75	—	—	—	—	112M	3500	112	3000	132M	3000
1,1	—	—	112M	3500	112	3500	132M	3000	132	3000
1,5	112M	3500	112	3500	132M	3500	132	3000	160M	3000
2,2	112	3500	132M	3500	132	3500	160M	3000	160	3000
3,0	132M	3500	132	3500	160M	3500	160	3000	180M	3000
4,0	132	3500	160M	3500	160	3500	180M	3000	200M	2500
5,5	160M	3500	160	3500	180M	3300	220M	3000	200	2500
7,5	160	3500	180M	3300	220M	3300	200	3000	—	—
11,0	180M	3300	200M	3300	200	3300	—	—	—	—
15,0	180	3300	—	—	—	—	—	—	—	—

* На напряжение 110 В не выполняются.

Таблица 8-6

Формы исполнения электродвигателей

Форма исполнения	Диапазон габаритов
IM1001; IM1011; IM1031	112; 132; 160; 180; 200
IM2101; IM2111; IM2131	180 и 200
IM3601; IM3611; IM3631	112; 132; 160; 180; 200

Номинальные мощности электродвигателей приведены в табл. 8-4 и 8-5. Формы исполнения электродвигателей серии 2П в зависимости от габаритов приведены в табл. 8-6.

Электродвигатели серии 2П предназначены для работы как от источников постоянного тока, так и от тиристорных преобразователей. Номинальные напряжения якорной цепи — 110; 220; 440; 600 В. Возбуждение независимое, номинальное напряжение возбуждения 110 и 220 В.

Электродвигатели мощностью до 200 кВт изготовляют на номинальные частоты вращения 750; 1000; 1500; 2200 и 3000 об/мин. Частота вращения электродвигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и ослаблением поля. Ослаблением поля допускается увеличение частоты вращения до пределов, указанных в табл. 8-4 и 8-5.

Электродвигатели серии 2П защищенного исполнения типов 2ПА и 2ПН выполняют с изоляцией класса нагревостойкости B, электродвигатели закрытого исполнения типов 2ПО и 2ПБ — с изоляцией класса нагревостойкости F.

Конструктивно электродвигатель серии 2П состоит из следующих основных узлов и деталей (рис. 8-3): станины, якоря, коллекторного щита, щита со стороны привода, защитных лент.

Корпус станины имеет цилиндрическую форму, изготавливается из стали Ст3. К корпусу винтами привернуты главные и дополнительные полюсы с обмотками. Главные полюсы состоят из сердечника и полюсного наконечника, которые штампуются заодно из листовой электротехнической стали 3411, 3413 толщиной 1 или 0,5 мм. Листы полюса скрепляют заклепками. Сердечники дополнительных полюсов также выполняют из электротехнической стали 3411 толщиной 1 мм. При высотах оси вращения до 132 мм сердечники дополнительных полюсов выполняют из полосовой стали Ст3. Обмотку главных полюсов (многослойную) выполняют из

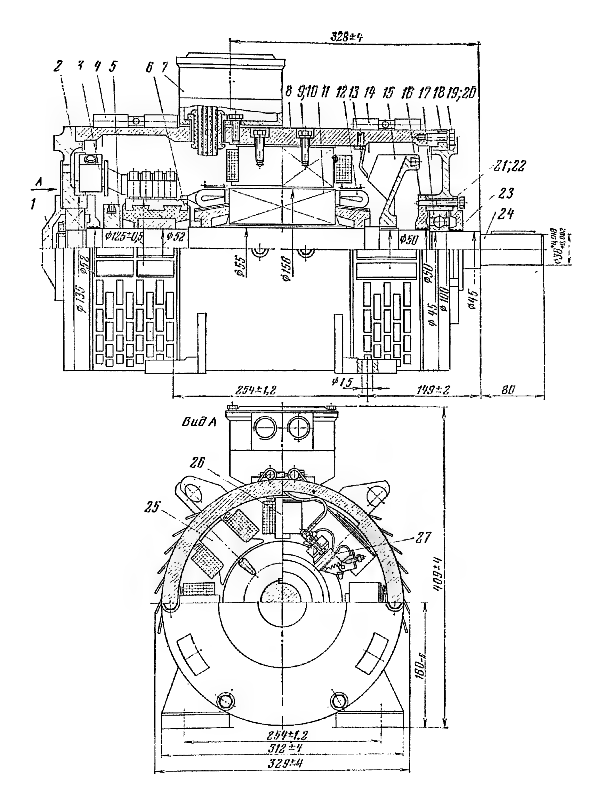
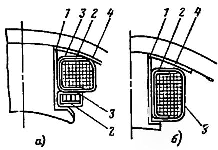


Рис. 8-3. Машина постоянного тока 2П-160М.

1 — крышка подшипника; *2* — щит подшипниковый; *3* — траверса; *4* — лента защитная; *5* — балансировочное кольцо; *6* — коллектор; *7* — коробка выводов; *8* — станина; *9* — болт; *10* — шайба М10; *11* — якорь; *12* — обмотка якоря; *13* — диффузор; *14* — защитная лента; *15* — вентилятор; *16* — крышка подшипника; *17* — шарикоподшипник 309; *18* — подшипниковый щит; *19* — болт М10×32; *20* — шайба М10; *21* — болт М6×60; *22* — шайба М6; *23* — крышка подшипника; *24* — вал; *25* — главный полюс; *26* — дополнительный полюс; *27* — щетки.

Таблица 8-7

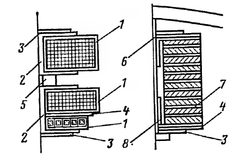
Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машины постоянного тока (h=80÷200 мм; напряжение до 600 В; изоляция классов нагревостойкости B, F, H)



Позиция на рис.	Назначение	Материал				Число слоев
		Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм	
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1,0	—
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

Таблица 8-8

Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машины постоянного тока (h=225÷315 мм; напряжение до 600 В; изоляция классов нагревостойкости B, F, H)

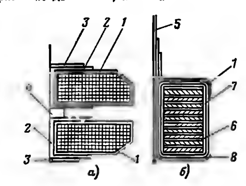


Позиция на рис.	Назначение	Материал					Число слоев
		Наименование, марка			Толщина, мм		
		Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F, H	
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань			2,0		1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ			
3	Рамка	Сталь Ст3			1,5		1
4	Рамка	Стеклотекстолит			1,5		1
		СТ	СТЭФ	СТК			

Позиция на рис.	Назначение	Материал: Наименование, марка — Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм — Класс B	Класс F, H	Число слоев
5	Скоба	Сталь Ст3			8—10		1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий	Синтофолий H	0,15	0,16	7,5
7	Прокладка междувитковая	Асбестовая бумага	Фенилоновая бумага 0,2 мм		0,3	0,2×2	1
8	Изоляция углов	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлестку

Таблица 8-9

Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока (h=355÷500 мм; напряжение до 1000 В; изоляция классов нагревостойкости B, F, H)



Позиция на рис.	Назначение	Материал: Наименование, марка — Класс B	Класс F	Класс H	Толщина, мм	Число слоев
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Стеклолакоткань ГИП-ЛСП-ЛСЛ	Стеклолакоткань ГИК-ЛСК-ЛСЛ	3,5	1
3	Рамка	Сталь Ст3			2—3	1
4	Скоба	Сталь Ст3			8—12	1
5	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий Е	Синтофолий Н	0,15	7,5
6	Прокладка междувитковая	Асбестовая бумага		Фенилоновая бумага 0,2 мм	0,3	1
7	Изоляция катушки	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Полиимидная пленка ПМ 0,05 мм	0,15	7
8	Хомут	Латунь Л62			2,0	1

круглого медного провода марки ПЭТВ. Обмотку дополнительных полюсов выполняют из круглого провода марки ПЭТВ или прямоугольного провода марки ПСД. Изоляция обмоток главных и дополнительных полюсов двигателей серии 2П приведена в табл. 8-7—8-9. Собранные катушки основных и дополнительных полюсов подвергают тщательной пропитке в нагревостойком изоляционном лаке, что обеспечивает их монолитность и влагостойкость. Пакет якоря выполняют из штампованных и изолированных лаком листов электротехнической стали марок 2211, 2312, 2411, 3413 толщиной 0,5 мм, напрессовывают непосредственно на вал и зажимают между двумя нажимными кольцами (обмоткодержателями), которые одновременно служат опорой для лобовых частей обмотки якоря. Один из обмоткодержателей упирается в уступ на валу, а другой запирается кольцом, насаженным на вал по горячей посадке. Вал изготовляется из стали марки 45, имеет ступенчатую форму для раздельной посадки на него сердечника якоря, коллектора и вентилятора.

Коллектор состоит из коллекторных пластин, изолированных друг от друга слюдяными пластинами, являющимися межламельной изоляцией. При наружном диаметре коллектора до 250 мм коллекторные пластины закрепляют пластмассой, которую впрессовывают во внутреннее отверстие между пластинами и коллекторной втулкой, предназначенной для посадки коллектора на вал. В качестве армирующей пластмассы используют пластмассу АГ-4с или К6.

Для присоединения концов обмотки якоря к коллектору в коллекторные пластины впаяны петушки.

К подшипниковому щиту со стороны коллектора с помощью болтов крепят траверсу щеткодержателей. Щеткодержатели штампуют на текстолитовых кольцах. В щеткодержателях установлены щетки. Аксиальную принудительную вентиляцию электродвигателя осуществляют при помощи литого вентилятора, насаженного на вал со стороны привода. Воздух забирается через жалюзи, выполненные в защитной ленте со стороны коллектора, и выбрасывается через отверстия в защитной ленте со стороны привода (выходного вала). Для рационального распределения охлаждающего воздуха над активными частями машины предусмотрен диффузор.

Со стороны коллектора на валу предусмотрено специальное балансировочное кольцо. В подшипниковых щитах со стороны привода и со стороны коллектора установлены шариковые или роликовые подшипники. Концы обмоток якоря и возбуждения выводят к болтам панели, размещенной в коробке выводов.

8-2. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В задании на проектирование машины постоянного тока должны быть указаны следующие данные.

1. Номинальная мощность машины, кВт.

2. Номинальное напряжение сети, В.

3. Номинальная частота вращения, об/мин.

4. Род возбуждения.

5. Исполнения по степени защиты, способу монтажа и способу охлаждения.

6. Условия эксплуатации при воздействии климатических и механических факторов.

7. Номинальный режим работы и допускаемое превышение температуры, класс изоляции по нагревостойкости.

8. Характеристики регулирования частоты вращения: диапазон регулирования частоты вращения вверх ослаблением поля главных полюсов, изменением напряжения сети и др.

9. Массогабаритные показатели.

10. Требования к коммутации.

11. Дополнительные технические требования, например показатели надежности и долговечности, значения КПД при номинальном режиме и определенном коэффициенте нагрузки.

При задании указанных величин вся последовательность расчета и проектирования машины постоянного тока соответствует установленным

практикой электромашиностроеиия принципам проектирования машин общепромышленного назначения. На основе электромагнитного, теплового и вентиляционного расчетов может быть спроектирована машина с учетом других дополнительных требований к конструкции и характеристикам машины.

При курсовом и дипломном проектировании следует максимально использовать данные серийных машин общепромышленного применения, приведенные в соответствующих стандартах на эти машины, конструкторские и технологические решения электромашиностроительных заводов, изученные в процессе производственной практики, а также материалы публикаций периодической печати и специальной технической литературы.

8-3. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Основной особенностью оформления конструктивной схемы современной электрической машины постоянного тока является то, что сейчас наравне с номинальными данными конструктору даются высота оси вращения и другие установочные размеры. Поэтому разработка конструкции электрической машины с заданными установочными размерами требует нового подхода к задаче выбора главных размеров.

Связь между главными размерами машины и электромагнитной мощностью определяется «машинной постоянной» по (1-1).

По формуле «машинной постоянной» можно рассчитать только произведение $D^2 l_\delta$, а для определения главных размеров D и l_δ необходимо предварительно задаться или отношением $\lambda = l_\delta/\tau$, или одним из размеров.

При заданной высоте оси вращения h наружный диаметр корпуса машины постоянного тока $D_н$, который определяется диаметром якоря, воздушным зазором и высотой полюса, не может превышать $2h$, т. е. $D_н < 2h$ (см. рис. 8-1).

На основании анализа конструкций машин постоянного тока можно принять

$$D_н = 2h - (8 \div 10)\cdot 10^{-3}, \quad (8\text{-}1)$$

а для четырехполюсных машин

$$D \approx h. \quad (8\text{-}2)$$

По данным многих типов и конструкций машин постоянного тока относительная радиальная высота магнитной системы $(D_н - D)/D = \mu$ является функцией числа полюсов. Область значений этой функции для

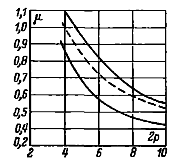


Рис. 8-4. К определению отношения наружного диаметра якоря к внутреннему диаметру.

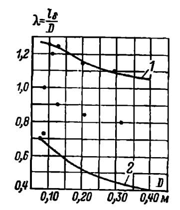


Рис. 8-5. Зависимость λ от диаметра якоря для машин общего назначения.

1 — верхняя граница; *2* — нижняя граница.

различных чисел полюсов приведена на рис. 8-4. Пользуясь (8-1) и (8-2), а также рис. 8-4, можно определить предварительные значения диаметра якоря D. Значение D уточняют после составления эскиза магнитной системы и междуполюсного окна. Далее по (1-1) при известном значении D определяют расчетную длину якоря l_δ.

Для машин общепромышленного применения рекомендованные значения λ' находятся в пределах $0{,}4 \leqslant \lambda' \leqslant 1{,}25$. Кривые зависимости $\lambda' = f(D)$ для этих машин приведе-

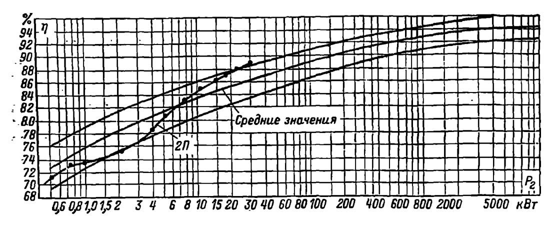


Рис. 8-6. Зависимость КПД от (см. рис. 8-6) мощности.

ны на рис. 8-5. Точками отмечены значения λ' машин серии 2П.

При выборе λ' необходимо иметь в виду также, что с увеличением длины машины уменьшается относительная длина лобовых частей, возрастает КПД, снижаются момент инерции машины и электромеханическая постоянная времени $T_{эм}$, но при этом ухудшаются условия охлаждения и коммутации машины. Поэтому выбор оптимальных главных размеров и отношения λ возможен только путем сравнения нескольких вариантов машины.

Электромагнитная мощность. В (1-1) в качестве расчетной мощности P' принимается электромагнитная мощность. Однако эту мощность можно определить только после полного расчета электрической машины — на этапе расчета ее характеристик. Поэтому мощность P' определяют предварительно по номинальной мощности и КПД, которым следует задаться.

Зависимость КПД от номинальной мощности для машин общего назначения приведена на рис. 8-6.

Для генераторов расчетная мощность принимается равной:

$$P' = k_г P_н, \qquad (8\text{-}3)$$

для двигателей

$$P' = k_д P_н/\eta_н. \qquad (8\text{-}4)$$

Значения коэффициентов $k_г$ и $k_д$ приведены в табл. 8-10.

Для электрических машин общего назначения можно определить предварительно электромагнитную мощность по формуле

$$P' = P_н \frac{1+\eta_н}{2\eta_н}, \qquad (8\text{-}4а)$$

где $\eta_н$ — КПД (см. рис. 8-6).

Таблица 8-10

Значения коэффициентов $k_г$, $k_д$, $k_в$

Мощность машины, кВт	$k_г$	$k_д$	$k_в$
До 1	1,4—1,15	0,65—0,85	0,2—0,08
1—10	1,2—1,1	0,82—0,95	0,1—0,025
10—100	1,15—1,06	0,85—0,97	0,035—0,02
100—1000	1,06—1,03	0,93—0,98	0,02—0,005

Выбор коэффициента полюсного перекрытия. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ, как следует из (1-1), непосредственно влияет на степень использования машины: с увеличением α_δ возрастает использование машины. Однако это приводит к уменьшению межполюсного расстояния $\tau - b_р$, происходит возрастание потоков рассеяния главных полюсов, увеличивается проникновение поля главных полюсов в зону коммутации, и в результате ухудшается коммутация машины.

Для машин общего назначения с дополнительными полюсами значение α_δ находится в пределах 0,55—0,72, без дополнительных полюсов $\alpha_\delta = 0,6 \div 0,85$.

На рис. 8-7 приведены зоны предельных значений α_δ для машин общего применения при числе полю-

сов $2p \geqslant 4$. Точками отмечены значения α_δ для машин серии 2П.

Выбор электромагнитных нагрузок. Объем якоря, определяемый произведением $D^2 l_\delta$, обратно пропорционален электромагнитным нагрузкам A и B_δ, поэтому увеличение A и B_δ приводит к улучшению использования объема якоря. Но с

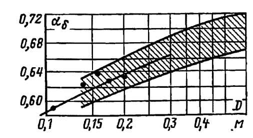


Рис. 8-7. Зависимость $\alpha_\delta = f(D)$.

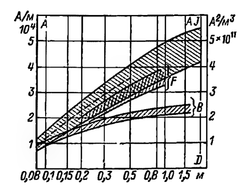


Рис. 8-8. Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря.

ростом A увеличивается нагрев якоря и машины, с ростом B_δ — насыщение отдельных участков магнитной цепи. Электромагнитные нагрузки оказывают влияние и на коммутацию машины.

Таким образом, уровень электромагнитных нагрузок нельзя определить однозначно и поэтому выбор A и B_δ на начальном этапе расчета машины, как правило, основывается на зависимостях, построенных в результате анализа ранее разработанных серий и отдельных типов машин.

Рекомендуемые значения A и B_δ в зависимости от диаметров якорей для машин общего назначения постоянного тока приведены на рис. 8-8, 8-9.

Верхние границы значений A (рис. 8-8) определяют предельные значения нагрузок для хорошо охлаждаемых машин при сравнительно легких условиях коммутации, нижние значения — для тихоходных машин или машин, работающих с перегрузками и частыми реверсами, а также для машин с

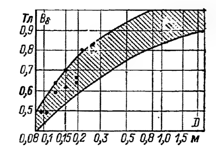


Рис. 8-9. Зависимость индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря.

уменьшенным значением воздушного зазора.

Выбор верхних значений индукции B_δ (рис. 8-9) оправдан в машинах, работающих с большими перегрузками, например в двигателях для реверсивных прокатных станов.

Однако, как видно из рис. 8-9, в некоторых серийных машинах с целью унификации отрезков серий приняты максимальные значения B_δ (показано точками). Целесообразность выбора этих значений подтверждается обычно сравнением ряда вариантов выбора главных размеров, геометрии зубцовой зоны и обмоток.

8-4. РАСЧЕТ ОБМОТКИ И ПАЗОВ ЯКОРЯ

В § 3-11 даны исходные рекомендации для выбора и расчета обмоток машин постоянного тока. Тип и число параллельных ветвей обмотки определяют, исходя из принятого числа главных полюсов $2p$ и тока параллельной ветви I_a. Число главных полюсов машин постоянного тока общего назначения в зависимости от диаметра якоря можно выбрать согласно рис. 8-10. При известной высоте оси вращения двигателей можно принимать: $2p=2$ при D до 0,1 м, $2p=4$ при $D=0{,}112 \div 0{,}5$ м.

Для расчета числа параллельных ветвей определяется предварительное значение тока якоря, А:

$$\left.\begin{aligned} I &= \frac{P_н}{U}(1 + k_В) - \\ &\text{для генераторов;} \\ I &= \frac{P_н}{U}(1 - k_В) - \\ &\text{для двигателей.} \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}5)$$

Значения коэффициента $k_В$ можно выбрать из табл. 8-10.

Исходя из принятого числа главных полюсов $2p$, предварительного значения тока якоря I и допустимого тока параллельной ветви $I_a = 250 \div 300$ А согласно табл. 3-14

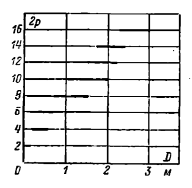


Рис. 8-10. Зависимость числа полюсов от диаметра якоря.

принимается тип обмотки. При токах якоря до 600 А допускается выбор простой волновой обмотки, от 500 до 1400 А — простой петлевой или лягушачьей, свыше 1400 А — двухходовой петлевой или лягушачьей обмотки.

Число проводников обмотки якоря

$$N = \frac{A\pi D \cdot 2a}{I}. \quad (8\text{-}6)$$

Согласно рекомендациям табл. 3-14 и ориентировочным значениям зубцового деления t_1 определяется число пазов якоря Z:

$$Z = \frac{\pi D}{t_1}. \quad (8\text{-}7)$$

Ориентировочные значения t_1 для различных высот оси вращения следующие:

h, мм . . .	80—200	225—315	355—500
t_1, мм . .	10—20	15—35	18—40

Число эффективных проводников обмотки в пазу N/Z должно быть в двухслойных обмотках четным числом.

По условиям коммутации пазовый ток $I_п = AI_1$ не должен превышать 1500—1600 А при $D < 1$ м и 2000 А при $D > 1$ м.

Для расчета числа коллекторных пластин K и числа секционных сторон в пазу $u_п$ целесообразно рассмотреть несколько вариантов выполнения обмоток.

Выбор варианта K, $u_п$, $w_с$

№ варианта	$u_п$	$K = u_п Z$	$w_с = N/2K$	$U_{к,ср} = \frac{2p\,U_п}{K}$

При сравнении вариантов следует учесть, что в двигателях с полузакрытыми пазами при всыпной обмотке из круглых проводников число витков секции $w_с = N/2K$ может быть дробным, так как в этом случае допускается выполнение секций, расположенных в одном пазу, с разным числом витков. Например, в некоторых машинах серии 2П при волновой обмотке с $u_п = 3$ число витков в секциях принято равным: 1—2—1; 2—1—2; 5—4—5.

При открытых пазах и проводах прямоугольного сечения значения $w_с$ должны округляться до ближайшего целого числа.

Максимальное число коллекторных пластин $K = u_п Z$ должно оцениваться по минимально допустимому значению коллекторного деления, которое в зависимости от диаметра коллектора должно быть не менее:

$D_к$, мм	125	140—280	315—500
$t_к$, мм	3,0	3,5	3,8

Минимальное значение K ограничивается допустимым значением напряжения между соседними коллекторными пластинами $U_{к,ср} = 2pU/K$.

Для серийных машин без компенсационной обмотки допускается $U_{к,ср}$ до 16 В, для машин с компенсационной обмоткой $U_{к,ср} \leq 20$ В, для машин малой мощности (до

1 кВт) $U_{к,ср} \leqslant 25 \div 30$ В. Для расчета коллекторного деления $t_к$ необходимо выбрать наружный диаметр коллектора $D_к$ из следующего ряда по ГОСТ 19780-74: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180, 200, 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560 мм.

Диаметр коллектора $D_к$ при открытых пазах якоря должен находиться в пределах

$$D_к = (0{,}65 \div 0{,}7) D. \qquad (8\text{-}8)$$

При полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе

$$D_к = (0{,}65 \div 0{,}8) D. \qquad (8\text{-}9)$$

После выбора варианта обмотки необходимо уточнить линейную нагрузку

$$A = \frac{2u_п Z w_c I_a}{\pi D} \qquad (8\text{-}10)$$

и скорректировать расчетную длину машины.

Поперечное сечение эффективного проводника обмотки якоря, м²,

$$q_a = I \cdot 2a / J_a, \qquad (8\text{-}11)$$

где J_a — плотность тока, А/м².

Определение допустимой плотности тока в зависимости от класса нагревостойкости изоляции возможно по значению произведения AJ (см. рис. 8-8). Область F соответствует классу нагревостойкости F, область B — классу B.

Для всыпных обмоток якоря с полузакрытыми пазами из табл. 3-15 следует выбрать круглый провод марки ПЭТВ при классе нагревостойкости изоляции B и ПЭТ-155 при классе нагревостойкости F. При классе нагревостойкости H могут быть применены провода марки ПСДКТ. Диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм.

Эффективные проводники всыпных обмоток обычно состоят из нескольких элементарных проводников выбранного диаметра. Число элементарных проводников $n_{эл}$ и сечение элементарного проводника $q_{эл}$ определяют из равенства

$$q_a = n_{эл} q_{эл}. \qquad (8\text{-}12)$$

Число $n_{эл}$ должно быть целым.

Сечение и размеры прямоугольных проводников обмотки якоря с открытыми пазами определяют при расчете размеров паза и зубца.

Форма паза и геометрия зубцовой зоны в целом зависят от диаметра якоря, типа и конструктивных характеристик обмотки.

Наиболее целесообразной с точки зрения технологии обмоточных работ формой паза является открытый паз с параллельными стенками. При прямоугольной форме проводников эти пазы обеспечивают наибольший коэффициент заполнения.

Но, с другой стороны, при открытых пазах возрастает коэффициент воздушного зазора, увеличивается пульсация магнитного потока, возрастают зубцовые гармонические электромагнитного момента. Увеличиваются также поверхностные и пульсационные добавочные потери в магнитной системе.

Области применения полузакрытых и открытых пазов указаны в гл. 3.

При диаметрах якоря до 0,05 м для упрощения формы штампа допускается применение пазов круглой формы.

При выбранной форме паза исходной величиной для расчета геометрии зубцовой зоны является площадь паза, обеспечивающая размещение в пазу проводников, изоляции и крепления с учетом коэффициента заполнения.

Овальные пазы якоря. При овальной форме паза зубцы выполняются с равновеликим по высоте сечением (рис. 8-11). Ширина зубца предварительно

$$b_z = \frac{B_\delta t_1}{k_c B_z}, \qquad (8\text{-}13)$$

где B_z — допустимое значение индукции в зубцах;
k_c — коэффициент заполнения пакета якоря сталью (табл. 6-11).

Значения магнитной индукции B_z в зависимости от частоты перемагничивания, степени защиты и способа охлаждения могут быть приняты согласно приведенным в табл. 8-11.

Таблица 8-11

Значения магнитной индукции в зубцах якорей с овальными пазами

Исполнение двигателя	Магнитная индукция B_z, Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,65—1,85	1,75—1,95	1,85—2,05	1,9—2,1
IP44, IC0141	1,4—1,6	1,5—1,7	1,55—1,75	1,6—1,8
IP44, IC0041	1,3—1,5	1,3—1,6	1,5—1,7	1,55—1,75

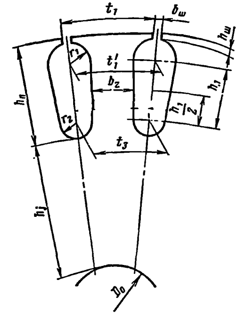


Рис. 8-11. *Полузакрытые пазы овальной формы с параллельными сторонами зубцов.*

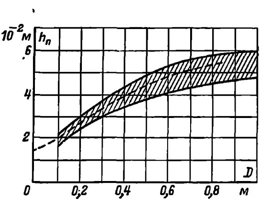


Рис. 8-12. Зависимость высоты паза от диаметра якоря.

Высота паза $h_п$ предварительно выбирается по рис. 8-12. При выборе высоты паза необходимо иметь в виду, что высота ярма якоря h_j (рис. 8-11) должна быть более или равной значению h_{jmin}, при котором магнитная индукция в спинке якоря является предельно допустимой (табл. 8-12).

Таблица 8-12

Предельные допустимые значения магнитной индукции в спинке якоря

Исполнение машины	Магнитная индукция B_j, Тл, при частоте перемагничивания, Гц	
	50—100	до 50
IP22, IC01, IP22, IC17 IP44, IC37	1,4	1,45
IP44, IC0141	1,15	1,2
IP43, IC0041	1,05	1,1

Примечание. При числе полюсов $2p=2$ предельные значения B_j следует увеличить на 0,2 Тл.

Минимальная высота спинки якоря h_{jmin} равна:

$$h_{j\,min} = \frac{\Phi}{2lk_c} + 2d_к/3, \quad (8\text{-}14)$$

где Φ — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб;

l — длина пакета якоря, м;

$d_к$ — диаметр аксиальных вентиляционных каналов, м.

Обычно магнитопроводы якорей с овальными пазами выполняются без аксиальных каналов, и только в некоторых случаях при высотах оси вращения $h \geqslant 200$ мм и диаметрах якоря свыше 200 мм выполняется один ряд аксиальных каналов.

При расчете $h_п$ и h_j необходимо задаться значением внутреннего диаметра листов якоря D_0 (рис.

Таблица 8-13

Наружные D и внутренние D_0 диаметры магнитопровода якоря с овальными пазами

h, мм	90	110	112	132	160	180	200
D, мм	90	106	110	132	156	180	202
D_0, мм	24	28	38	50	55	60	65

8-11). Это значение приближенно определяется по табл. 8-13.

При выбранной ширине зубца b_z и установленном значении $h_п$ определяются размеры и площади сечения паза: высота $h_ш$ принимается равной 0,5—0,8 мм; ширина шлица $h_ш$ должна быть больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины пазовой изоляции;

больший радиус r_1, м,

$$r_1 = \frac{\pi(D-2h_ш)-Zb_z}{2(Z+\pi)}; \quad (8\text{-}15)$$

меньший радиус, м,

$$r_2 = \frac{\pi(D-2h_п)-Zb_z}{2(Z-\pi)}; \quad (8\text{-}16)$$

расстояние h_1, м,

$$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2; \quad (8\text{-}17)$$

площадь паза в штампе, м²,

$$S_п = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + \left(r_1 + r_2\right)h_1; \quad (8\text{-}18)$$

площадь сечения пазовой изоляции, м²,

$$S_{из} = b_{из}(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1), \quad (8\text{-}19)$$

где $b_{из}$ — односторонняя толщина пазовой изоляции (табл. 3-15);

площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_к \approx (3 \div 5)r_1; \quad (8\text{-}20)$$

площадь поперечного сечения паза, заполненная обмоткой, м²,

$$S_{п.о} = S_п - S_{из} - S_к; \quad (8\text{-}21)$$

площадь поперечного сечения обмотки, уложенной в один паз, м²,

$$S_о = \frac{2d_{из}^2\, n_{эл}\, u_п\, w_с}{k_з}, \quad (8\text{-}22)$$

где $d_{из}$ — диаметр одного изолированного провода;
$n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном проводнике;
$w_с$ — число витков в секции;
$u_п$ — число секционных сторон в пазу;
$k_з$ — коэффициент заполнения паза изолированными проводниками: $k_з = 0{,}68 \div 0{,}72$.

Если площадь поперечного сечения паза $S_{п.о}$ больше площади поперечного сечения обмотки $S_о$, то необходимо выбрать проводники большего диаметра и снизить плотность тока J_a обмотки якоря. Если $S_о > S_{п.о}$, то требуется увеличить плотность тока и выбрать проводники меньшего сечения, при которых обеспечивается коэффициент заполнения паза $k_з$ не более 0,72.

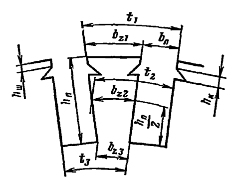


Рис. 8-13. Открытые пазы с параллельными стенками при креплении обмоток клиньями.

Средняя длина полувитка секций обмотки якоря с овальными пазами и всыпными обмотками, м,

$$l_{аср} = l_л + l_п, \quad (8\text{-}23)$$

где $l_л$ — длина лобовой части, м; $l_п$ — длина якоря, м.

Средняя длина лобовой части: при $2p = 2$

$$l_л \approx 0{,}9\tau; \quad (8\text{-}24)$$

при $2p = 4$

$$l_л \approx (1{,}2 \div 1{,}3)\tau. \quad (8\text{-}25)$$

Сопротивление обмотки якоря по (4-34), Ом,

$$R_a = \rho_\vartheta \frac{Nl_{аср}}{(2a)^2 q_a}, \quad (8\text{-}26)$$

где ρ_ϑ — удельное сопротивление меди при расчетной рабочей температуре по табл. 4-1.

Масса меди обмоток, кг,

$$m_{мa} = 8900 l_{аср} N q_a. \quad (8\text{-}27)$$

Прямоугольные пазы якоря. При прямоугольной форме паза (рис. 8-13 и 8-14) предварительно необходимо задаться высотой паза $h_п$ (рис. 8-12). Ширина зубца в минимальном сечении b_{z3} (у основания паза) определяется допустимой

Таблица 8-14

Индукция в минимальном сечении зубцов якорей с прямоугольными пазами

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция $B_{z\,max}$, Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	До 25
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,9—2,1	2,0—2,2	2,1—2,3	2,2—2,4
IP44, IC0141	1,6—1,8	1,7—1,9	1,8—2,0	1,9—2,1
IP44, IC0041	1,5—1,7	1,6—1,8	1,7—1,9	1,8—2,0

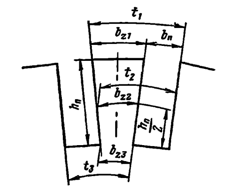


Рис. 8-14. Открытые пазы с параллельными стенками при креплении обмоток бандажом.

индукцией $B_{z\,max}$, значения которой можно принять по табл. 8-14.

Якоря машин постоянного тока общего назначения с прямоугольными пазами при диаметрах свыше 0,2 м имеют аксиальные вентиляционные каналы. При диаметрах до 0,3 м достаточно выполнить один ряд каналов диаметром от 15 до 22 мм при числе каналов от 18 до 25. При диаметрах выше 0,3 м (до 0,5 м) выполняют два ряда каналов диаметром от 24 до 34 мм с числом каналов от 24 до 30.

При диаметрах якоря до 0,5 м пакет магнитопровода насаживается непосредственно на вал. Внутренний диаметр сердечника в этом случае принимается равным $D_0 \approx \approx 0{,}3D$ или $D_0 \approx 27\sqrt[3]{P_н/n_п}$ (где $P_н$ — номинальная мощность, кВт, $n_п$ — номинальная частота вращения, об/мин).

При диаметрах сердечника выше 0,5 м между внутренней поверхностью ярма якоря и валом располагают втулку или якорную звезду, конструктивно выполненную аналогично роторной звезде крупных синхронных машин (гл. 7).

Размеры паза $h_п$ и $b_п$ и спинки якоря h_j уточняются после проверки индукции в спинке якоря B_j, которая не должна превышать предельных значений, приведенных в табл. 8-12.

При креплении обмоток в пазах якоря бандажом (этот вид крепления практикуется в машинах с диаметром якоря от 0,22 м до 0,33 м) высота бандажной канавки принимается равной 3—3,5 мм. В этом случае пазы выполняются с гладкими стенками (рис. 8-14).

При креплении обмоток в пазах якоря диаметром свыше 0,33 м клиньями (рис. 8-13) высота клина $h_к$ принимается равной 4 мм, высота шлица $h_ш = 1$ мм.

После выбора размеров паза и зубца устанавливаются по размещению в пазу проводников и изоляции (см. табл. 3-16, 3-17) ширина и высота проводников. Максимальная ширина проводника с изоляцией

$$b_{пр} = \frac{b_п - b_{из}}{u_п}. \qquad (8\text{-}28)$$

При скосах пазов на одно или половину зубцового деления расчетную ширину паза необходимо уменьшить на 0,1 мм.

Предельно допустимое значение высоты проводника с изоляцией равно:

$$a_{пр} = \frac{h_п - h_{из} - h_к}{2w_с}, \qquad (8\text{-}29)$$

где $w_с$ — число витков в секции;
$h_к$ — высота клина.

При креплении обмоток бандажом в (8-29) необходимо вместо $h_к$ подставить $h_б$ — высоту бандажных канавок. Высота $h_б \approx 0{,}01D$

С целью уменьшения эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки якоря и снижения добавочных потерь высота элементарного проводника должна быть не более 4 мм при $f \geqslant 100$ Гц, 7 мм при $f = 50$ Гц, 10 мм при $f \leqslant 25$ Гц. В этом случае допускается эффективный проводник подразделять по

высоте на два элементарных проводника, каждый из которых имеет высоту не более допустимой для данной частоты.

По размерам $a_{пр} \times b_{пр}$ необходимо взять по табл. П-29 размеры и сечение проводника выбранной марки.

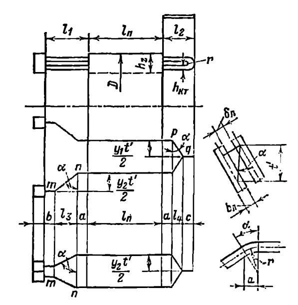


Рис. 8-15. К расчету длины секции обмотки якоря.

Для обмоток якорей с прямоугольными пазами при $h \leqslant 315$ мм выбираются прямоугольные проводники марки ПЭТВП при классе нагревостойкости изоляции В и ПЭТП-155 при классе нагревостойкости F. При высотах оси вращения до 0,5 м применяются провода марки ПСД классов нагревостойкости В и F и ПСДК — класса нагревостойкости Н.

После проверки размещения всех проводников обмотки якоря в пазу с учетом клина, пазовой и витковой изоляции уточняются размеры паза, которые округляются до ближайшей большей десятой миллиметра.

По выбранному сечению проводника определяются плотность тока, А/м²,

$$J_a = I_a / q_a \qquad (8\text{-}30)$$

и произведение AJ, А²/м³.

Полученное значение произведения AJ необходимо сравнить с рекомендованными (см. рис. 8-8). Если AJ превышает допустимые значения, то необходимо увеличить площадь паза и, повторив расчет зубцовой зоны и размеров проводников, установить окончательные размеры паза.

Размеры секций обмотки якоря (рис. 8-15) определяются по чертежу пакета якоря и обмоточным данным.

Длина переднего l_1 и заднего l_2 вылетов секции равна, м:

$$l_1 = l_3 + a + b; \qquad (8\text{-}31)$$

$$l_2 = l_4 + a + c, \qquad (8\text{-}32)$$

где a — прямолинейный участок секции с учетом радиуса изгиба; в зависимости от напряжения значения a принимают:

U, В	250	500	750	1500
a, м	0,013	0,015	0,019	0,025

b — прямолинейный участок концов секции, который при перекрученных проводниках секции равен 0,015—0,02 м, при расплющенных концах секций 0,04 м, при выполнении секции без скрутки проводников 0,012—0,015 м;

c — прямолинейный участок у головок секций (с учетом радиуса изгиба): $c = 0{,}004 + r + h_{кт}$.

Прямолинейные участки лобовых частей передней части секции $mn = l_5$ и задней $pq = l_6$ равны:

$$l_5 = \frac{y_2 t'}{2\cos\alpha}; \quad l_6 = \frac{y_1 t'}{2\cos\alpha}; \qquad (8\text{-}33)$$

соответственно вылеты l_3 и l_4 равны:

$$l_3 = \frac{y_2 t' \operatorname{tg}\alpha}{2}; \quad l_4 = \frac{y_1 t' \operatorname{tg}\alpha}{2}, \qquad (8\text{-}34)$$

где $y_1 = \dfrac{Z}{2p} \pm \varepsilon$;

$y_2 = y - y_1$ (табл. 3-14).

Шаг t' для предварительных расчетов принимают равным:

$$t' = \frac{\pi (D - 2h_п)}{Z}. \qquad (8\text{-}35)$$

Угол α определяют согласно рис. 8-15:

$$\sin\alpha = \frac{b_л + \delta_л}{t'}, \qquad (8\text{-}36)$$

где $b_л$ — толщина катушки в лобовой части; $b_л \approx 1{,}2\, b_п$; $\delta_л$ — расстоя-

ние между лобовыми частями двух соседних катушек: $\delta_л = (0,4 \div 10) \times 10^{-3}$ м.

Длина полувитка обмотки якоря, м,

$$l_{аср} = l_п + 2a + l_б + l_в + b + c. \quad (8\text{-}37)$$

Сопротивление и масса обмотки определяются по (8-26) и (8-27) соответственно.

8-5. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПОД ГЛАВНЫМИ ПОЛЮСАМИ. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Воздушный зазор под главными полюсами оказывает влияние на магнитное сопротивление магнит-

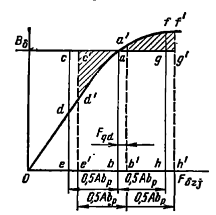


Рис. 8-16. Переходная характеристика машины постоянного тока.

ной цепи машины, МДС обмотки возбуждения и потери в ней. От воздушного зазора зависит также размагничивающее действие реакции якоря.

Поскольку в машинах постоянного тока, за редким исключением, щетки устанавливаются строго по линии геометрической нейтрали, а магнитная цепь машины насыщена, то при расчете реакции якоря рассматривают только ее поперечную составляющую.

Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря производят по переходной характеристике $B_\delta = \varphi(F_{\delta zj})$ (рис. 8-16), построенной по результатам расчета магнитной цепи (см. табл. 8-19). При нагрузке под действием поперечной реакции якоря магнитное поле в воздушном зазоре искажается: под одним краем полюса индукция уменьшается, под другим возрастает. Точки d и f, отстоящие от ординаты ab на расстоянии $0{,}5Ab_p$ (где b_p — ширина полюсной дуги), определяют значения $B_{\delta min}$ и $B_{\delta max}$ под краями полюсов, а кривая daf — распределение индукции в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги.

Среднее значение индукции в воздушном зазоре в этом случае можно определить по формуле приближенной квадратуры:

$$B_{\delta ср} = (B_{\delta\, min} + 4B_\delta + B_{\delta\, max})/6, \quad (8\text{-}38)$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре в режиме холостого хода.

Для определения МДС размагничивания поперечной реакции якоря F_{qd} необходимо ось ab криволинейного четырехугольника $edafh$ сместить на bb', при которой площади криволинейных треугольников $d'c'a$ и $af'g'$ равны. При этом с достаточной степенью точности можно принять разность ординат $a'b' - ab$ равной $\Delta B = B_\delta - B_{\delta ср}$.

Как следует из переходной характеристики, поперечная реакция якоря нарастает от середины полюсной дуги к его краям. При значительной поперечной реакции якоря может возникнуть условие, когда $F_{\delta zj}$ будет меньше $0{,}5Ab_p$, и поэтому точка d на переходной характеристике сместится в область отрицательных значений B_δ, т. е. индукция в воздушном зазоре под одним краем полюса изменит знак; произойдет опрокидывание поля. Так как наибольшим магнитным сопротивлением участка магнитной цепи, по которому замыкается поле реакции якоря (воздушный зазор, зубцы якоря и спинка якоря), обладает воздушный зазор, то его величина выбирается таким образом, чтобы индукция B_δ на протяжении всей полюсной дуги не изменяла своего направления. Обычно это условие выполняется, если воздушный зазор δ находится в пределах, указанных на рис. 8-17. С целью снижения реакции якоря под краями полюсов воздушный зазор выполняется эксцентричным или с приподнятыми краями (рис. 8-18). В этом

случае расчетный воздушный зазор может быть принят равным

$$\delta_p = 0{,}75\delta_1 + 0{,}25\delta_2. \quad (8\text{-}39)$$

Зазор δ_2 принимают равным (2—3) δ_1.

При диаметрах якоря серийных машин постоянного тока свыше 0,3 м, а также в машинах с $P_н/n_н > 0{,}2$ кВт/(об/мин) или с широким диапазоном регулирования частоты

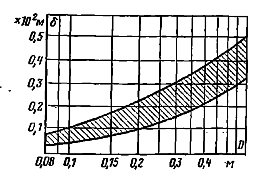


Рис. 8-17. Предварительное определение воздушного зазора по диаметру якоря.

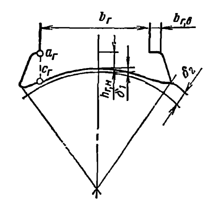


Рис. 8-18. Полюсной наконечник главного полюса.

вращения и большой кратностью перегрузок для компенсации поперечной реакции якоря в зоне полюсной дуги применяют компенсационную обмотку. Применение компенсационной обмотки позволяет выполнить относительно небольшой воздушный зазор под главными полюсами и уменьшить массу меди обмотки возбуждения.

Однако наличие компенсационной обмотки усложняет производство и увеличивает стоимость машины.

Конструктивно компенсационную обмотку выполняют в виде однослойной катушечной или стержневой обмотки и укладывают в пазы наконечников главных полюсов (рис. 8-19) таким образом, что ось обмотки совпадает с осью дополнительных полюсов.

Типичная схема компенсационной обмотки приведена на рис. 8-2, где буквами N и S обозначена полярность дополнительных полюсов.

При расчете компенсационной обмотки обычно принимают, что

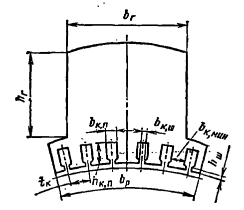


Рис. 8-19. Пазы компенсационной обмотки.

она должна создавать в зоне полюсной дуги МДС в пределах

$$F_к = (0{,}85 \div 1{,}15)\, A \frac{b_p}{2}. \quad (8\text{-}40)$$

Компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, что автоматически обеспечивает компенсацию реакции якоря при любом токе нагрузки.

Во избежание вибраций магнитного происхождения зубцовый шаг по полюсному наконечнику $t_к$ (рис. 8-19) должен отличаться от зубцового шага t_1 по якорю. Это условие обычно указывается в виде требования

$$Z_к \neq (0{,}85 \div 1{,}15) \frac{Z}{2p} \alpha_\delta. \quad (8\text{-}41)$$

Число зубцов $Z_к$ должно быть четным. Выбор числа зубцов $Z_к$ и расчет зубцовой зоны компенсационной обмотки производят в следующем порядке.

Определяют число проводников компенсационной обмотки на один полюс:

$$N_к = \frac{A b_p a_к}{I}, \quad (8\text{-}42)$$

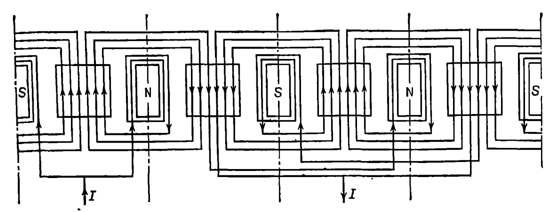


Рис. 8-20. Схема компенсационной обмотки.

где $a_к$ — число параллельных ветвей компенсационной обмотки; I — ток якоря, А.

Число параллельных ветвей компенсационной обмотки принимают $a_к=1$. Если ток в пазу при $a_к=1$ превышает 2000 А, выполняют соединение компенсационной обмотки в две параллельные ветви ($a_к=2$). Выбирая $Z_к$ в диапазоне $Z_к=6\div12$, определяют шаг $t_к$, ширину зубца $b_{zк}=t_к B_\delta\, \sigma_г/B_{zк}k_с$, где $\sigma_г=1{,}05$ — коэффициент рассеяния главного полюса; $B_{zк}=1{,}6\div1{,}8$ Тл — индукция в минимальном сечении зубца компенсационной обмотки.

Ширина паза в свету равна:

$$b_п = t_к - b_{zк min}. \qquad (8\text{-}43)$$

При выбранном числе зубцов $Z_к$ определяют число проводников обмотки в одном пазу:

$$n_к = N_к/Z_к. \qquad (8\text{-}44)$$

Число $n_к$ округляют до ближайшего целого числа.

Таблица 8-15

Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока (пазы прямоугольные полузакрытые; обмотка однослойная стержневая; $h=355\div500$ мм; напряжение до 1000 В; изоляция классов нагревостойкости В, F, H)

Позиция на рисунке	Материал						Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции, мм			
	Наименование, марка			Толщина, мм						Рисунок а		Рисунок б	
	Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	Класс B	Класс F	Класс H	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-994-ТП		Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,1	0,05	1 вполнахлеста		2 вполнахлеста	—	—	0,8	0,8
2	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,16	0,16	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	3,5 оборота	1,1	1,1	1,1	1 1
3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенилоновая бумага		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
—	Допуск на укладку обмотки									0,2	0,4	0,3	0,4
—	Общая толщина изоляции в пазу									1,6	1,8	2,5	2,6

Таблица 8-16

Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые; обмотка однослойная секционная из голых проводов; h=355÷500 мм; напряжение до 1000 В; изоляция класса нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине $u_{п,\,шир}$: 1	по ширине $u_{п,\,шир}$: 2	по высоте при $u_{п,\,выс}$: 2	по высоте при $u_{п,\,выс}$: 3	по высоте при $u_{п,\,выс}$: 1
Пазовая	1	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	2	То же	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	3	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	4	Стеклолакоткань	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	5	Стеклотекстолит	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки			0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)			2,22	2,78	3,68	4,24	4,8
Лобовая	6	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	7	То же	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	8	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Общая толщина изоляции секции в лобовой части			1,32	1,88	1,88	2,44	3,00

Площадь поперечного сечения проводника, м²,

$$q_к = \frac{I}{a_к J_к}, \qquad (8\text{-}45)$$

где $J_к$ — плотность тока в компенсационной обмотке, А/м².

В зависимости от класса нагревостойкости изоляции плотность тока $J_к$ принимается $(4,7—5,2)\cdot 10^6$ А/м² для класса В, $(5,3—5,8)\cdot 10^6$ А/м² для класса F и $(6,0—6,6)\cdot 10^6$ А/м² для класса Н.

Если число проводников в пазу $n_к>2$, то компенсационную обмотку целесообразно выполнять катушечной с укладкой в открытые пазы. Размещение проводников в этом случае в зависимости от выбранных размеров элементарного провода может осуществляться либо меньшей, либо большей стороной по ширине паза; стороны катушечных групп могут укладываться как в один, так и два ряда по ширине паза (рис. 8-21, *а*—*в*).

При числе проводников в пазу $n_к=1$ или 2 (рис. 8-21, *г*, *д*) обмотку выполняют стержневой. Стержни обмотки изготовляют из голой шинной меди, изолируют и вставляют с торца в полузакрытые пазы, ширину шлица паза принимают равной 2—3 мм. В лобовых частях стержни соединяют дугами из голых медных шин.

Конструкция изоляции компенсационных обмоток в пазу и лобовых частях приведена в табл. 8-15—8-17.

Таблица 8-17

Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока (пазы прямоугольные открытые; обмотка однослойная секционная из голых проводов; $h=355 \div 500$ мм; напряжение до 1000 В)

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал: Наименование, марка — Класс F	Класс H	Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм: по ширине при $u_{п,шир}$ — 1	2	по высоте при $u_{п,выс}$ — 2	3	4
Пазовая	1	Фениловая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	2	Полиимидная пленка ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Фениловая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	4	Стеклянная лента ЛЭС		0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	5	Фениловая бумага		0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	6	Стеклотекстолит								
		СТЭФ	СТК	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки				0,3	0,3	0,5	0,5	0.5
	—	Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)				2,5	2,9	3,6	4,0	4,4
Лобовая	7	Фениловая бумага		0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	8	Полиимидная пленка ПМ		0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	9	Фениловая бумага		0.05	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклянная лента ЛЭС		0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	—	Общая толщина изоляции секции в лобовой части				1,8	2,2	2,2	2,6	3,0

После выбора стандартных размеров проводника, схемы размещения проводников в пазу и класса нагревостойкости изоляции обмотки окончательно рассчитывают размеры пазов, уточняют степень компенсации

$$k_к = \frac{N_к I}{a_к b_p A}. \qquad (8\text{-}46)$$

Коэффициент $k_к$ должен находиться в пределах 0,85—1,15.

Высота клина принимается равной $h_к = 2{,}5$ мм, высота шлица $h_ш = 1{,}0$ мм.

Средняя ширина катушки компенсационной обмотки, м,

$$b_{к,кат,ср} = \frac{\pi (D_г + h_к)}{2p} - \frac{b_p}{2} \frac{(D_г + h_к)}{D_г}, \qquad (8\text{-}47)$$

где $D_г$ — диаметр внутренней поверхности главного полюса;

$h_к$ — высота паза компенсационной обмотки;

b_p — ширина полюсного наконечника.

Средняя длина лобовой части компенсационной обмотки, м,

$$l_{к,л} \approx 1{,}2 b_{к,кат,ср}. \qquad (8\text{-}48)$$

Средняя длина прямолинейной

части катушки компенсационной обмотки

$$l_{к.п} = l_п + 2b_{л.к}, \qquad (8-49)$$

где $b_{л.к}$ — средняя длина прямолинейного участка компенсационной обмотки от торца полюсного наконечника до радиуса закругления:

$b_{л.к} = 0{,}05$ м при стержневой обмотке и $b_{л.к} = 0{,}03$ м при катушечной обмотке.

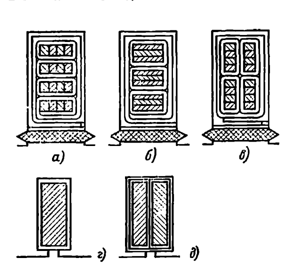


Рис. 8-21. Укладка проводников в пазы компенсационной обмотки.

Средняя длина полувитка обмотки, м,

$$l_{к.ср} = l_{к.п} + l_{к.л}. \qquad (8-50)$$

Сопротивление компенсационной обмотки, Ом,

$$R_к = \rho_\vartheta \frac{N_к\, l_{к.ср} \cdot 2p}{a_к^2 q_к}. \qquad (8-51)$$

Масса меди компенсационной обмотки, кг,

$$m_к = 8900 l_{к.ср} N_к \cdot 2p q_к. \qquad (8-52)$$

8-6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная система машин постоянного тока представляет собой $2p$ симметричных магнитных цепей (рис. 8-22), каждая из которых состоит из семи последовательно соединенных условно однородных участков: воздушного зазора под главными полюсами, зубцов якоря, ярма якоря, зубцов полюсных наконечников главных полюсов (у компенсированных машин), сердечника главного полюса, зазора между главным полюсом и станиной и станины.

Замкнутый контур магнитных линий пары полюсов является симметричным относительно оси геометрической нейтрали (рис. 8-23), поэтому расчет магнитной цепи машин постоянного тока достаточно производить на один полюс.

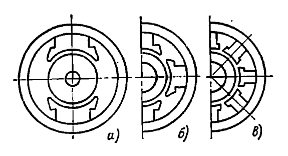


Рис. 8-22. Магнитные системы машин постоянного тока.

а — двухполюсная; *б* — четырехполюсная; *в* — восьмиполюсная.

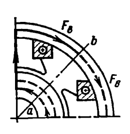


Рис. 8-23. Магнитная цепь пары полюсов.

Для расчета магнитной цепи необходимо знать размеры всех участков магнитопровода, площади их сечения, магнитные потоки этих участков. Указанные данные для машин постоянного тока приведены в табл. 8-18.

В табл. 8-18 приведены отдельные коэффициенты и размеры, которые для магнитных систем машин постоянного тока могут быть рассчитаны следующим образом.

1. Коэффициент воздушного зазора k_δ, учитывающий влияние зубчатости якоря $k_{\delta a}$, зубцов компенсационной обмотки на главном полюсе $k_{\delta к}$, бандажных канавок $k_{\delta б}$ и радиальных вентиляционных каналов $k_{\delta в.к}$ на магнитное сопротивление воздушного зазора,

Таблица 8-18

Данные для расчета магнитной цепи

Участок магнитной цепи	Расчетная длина участка, м	Площадь сечения участка, м²	Магнитный поток при номинальном режиме	Индукция в сечении участка
Воздушный зазор под главным полюсом	$L_\delta = k_\delta \delta$	$S_\delta = b'_p l_\delta = \alpha_\delta \tau l_\delta$	$\Phi_{\delta н} = \frac{60aE_н}{n_н pN}$	$B_{\delta н}$
Зубцы якоря овальной формы (рис. 8-11)	$L_z = h_п - 0{,}2r_1$	$S_z = \frac{Z\alpha_\delta b_z l_\delta k_c}{2p}$	$\Phi_{\delta н}$	$B_z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_z}$
Зубцы якоря прямоугольной формы (рис. 8-13, 8-14)	$L_z = h_п$	$S_{z3} = \frac{\pi\alpha_\delta l_\delta}{2p} \times$ $\times (D - 2h_п - Zb_п) k_c$	$\Phi_{\delta н}$	$B_{z3} = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_{z3}}$
Ярмо якоря	$L_j = \frac{\pi(D_0 + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2}$	$S_j = l(h_j - 2/3d) k_c$	$\Phi_{\delta н}$	$B_j = \frac{\Phi_{\delta н}}{2S_j}$
Зубцы наконечника главного полюса (рис. 8-19) с компенсационной обмоткой	$L_{к.п} = h_{к.п}$	$S_{к.п} = (b_p - Z_к b_{к.п}) \times$ $\times l_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_к = \frac{\Phi_{\delta н} \sigma_г}{S_{к.п}}$
Сердечник главного полюса (рис. 8-19)	$L_г = h_г$	$S_г = l_г b_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{S_г}$
Зазор между главным полюсом и станиной	$L_{с.п} = \delta_{с.п} =$ $= 2l_г \cdot 10^{-4} + 10^{-4}$	$S_{с.п} = S_г$	$\sigma_г \Phi_{\delta н}$	$B_{с.п} = B_г$
Станина	$L_с = \frac{\pi(D_н - b_с)}{4p} + \frac{b_с}{2}$	$S_с = l_с h_с$	$\sigma_г \frac{\Phi_{\delta н}}{2}$	$B_с = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{2S_с}$

равен:

$$k_\delta = k_{\delta a} k_{\delta к} k_{\delta б} k_{\delta в.к}, \quad (8\text{-}53)$$

где

$$k_{\delta a} = 1 + \frac{b_ш}{t_1 - b_ш + 5\delta t_1/b_ш}, \quad (8\text{-}54а)$$

или

$$k_{\delta a} = \frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - b_ш + 10\delta}; \quad (8\text{-}54б)$$

$b_ш$, t_1 — по рис. 8-11; при прямоугольных пазах (рис. 8-13) вместо $b_ш$ вводится $b_п$;

$$k_{\delta к} = 1 + \frac{b_{к,ш}}{t_к - b_{к,ш} + 5\delta t_к/b_{к,ш}}; \quad (8\text{-}55)$$

$b_{к,ш}$, $t_{к,ш}$ — по рис. 8-19.

При бандажах из немагнитного материала

$$k_{\delta б} = 1 + \frac{b_б h_б}{l_a(\delta + h_б) - b_б h_б}, \quad (8\text{-}56)$$

где $b_б$ — общая ширина бандажных канавок на якоре;

$h_б$ — глубина бандажных канавок;

l_a — длина якоря.

При бандажах из магнитной проволоки

$$k_{\delta б} = 1 + \frac{b_б(h_б + 0{,}8d)}{l_a(\delta + h_б - 0{,}8d) - b_б(h_б - 0{,}8d)}, \quad (8\text{-}57)$$

где d — диаметр бандажной проволоки.

Размеры и число бандажных канавок определяются предварительно и уточняются после механического расчета бандажа (см. гл. 9).

Коэффициент

$$k_{\delta п.к} = 1 + \frac{3\delta}{l_п + 3\delta\,(1 + l_п/b_{р.к})}, \quad (8\text{-}58)$$

где $l_п$ — длина пакета;

$b_{р.к}$ — ширина вентиляционного канала.

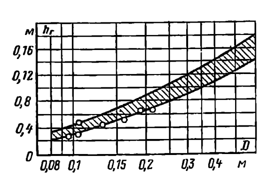


Рис. 8-24. К определению высоты главного полюса.

2. Расчетная ширина полюсной дуги $b'_p = b_p$ при эксцентричном зазоре под главными полюсами и $b'_p = b_p + 2\delta$ при концентрическом зазоре под главными полюсами с компенсационной обмоткой.

3. Расчетная длина якоря l_δ равна длине пакета якоря $l_п$, т. е. $l_\delta = l_a$ при отсутствии радиальных вентиляционных каналов и $l_\delta = l_п - n_к b_{р.к}$ при наличии $n_к$ радиальных вентиляционных каналов шириной $b_{р.к}$ каждого канала.

4. Расчетная длина станины $l_с$ для машин постоянного тока общепромышленных серий может быть принята:

$$l_с = l_г + 0{,}4D, \quad (8\text{-}59)$$

где $l_г$ — длина главного полюса.

5. Высоту главного полюса $h_г$ для машин постоянного тока с диаметром якоря до 0,5 м предварительно можно определить по рис. 8-24. При $D > 0{,}5$ м для предварительного определения высоты полюса необходимо использовать установленные зависимости $D_н = \varphi(D;\, p)$, приведенные на рис. 8-4.

6. Высота станины $h_с$ определяется при известных радиальных размерах магнитной системы:

$$h_с = \frac{D_н - (D + 2\delta)}{2} - h_г - h_{г.н}, \quad (8\text{-}60)$$

где $h_{г.н}$ — высота наконечника главного полюса (см. рис. 8-18), выбирается исходя из условия, чтобы магнитная индукция в сечении $a_г c_г$ не превышала 1,8—1,9 Тл; индукция в станине из массивной стали не должна превышать $B_с = 1{,}3$ Тл (1,05 Тл при классе изоляции H). Увеличение магнитной индукции сверх установленных значений приводит в первую очередь к ухудшению коммутации машины.

7. Ширина выступа наконечника главного полюса $b_{г.в}$ может быть принята равной (0,1—0,15) $b_г$.

Ширина сердечника главного полюса

$$b_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{k_с l_г B_г}, \quad (8\text{-}61)$$

где $B_г$ — индукция в сердечнике главного полюса. Для сталей марок 3411, 3412, 3413 $B_г = 1{,}6 \div 1{,}7$ Тл, для сталей 1211 и 1212 $B_г = 1{,}35 \div 1{,}55$ Тл. При исполнении машины по степеням защиты IP44 и способу охлаждения IC0141 и IC0041 индукция $B_г$ должна быть снижена на 0,2—0,3 Тл.

8. Коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов $\sigma_г$ зависит от воздушного зазора δ, ширины междуполюсного окна $\tau - b_г$ и ширины полюсного наконечника добавочного полюса.

В каждом конкретном случае путем моделирования магнитного поля в воздушном зазоре можно определить $\sigma_г$.

При расчетах магнитных цепей машин постоянного тока можно принять $\sigma_г = 1{,}15$ для двухполюсных машин, $\sigma_г = 1{,}2$ для четырехполюсных машин без компенсационной обмотки, $\sigma_г = 1{,}25$ при $2p = 4$ и 6 и наличии компенсационной обмотки.

Для построения характеристики намагничивания машины постоянного тока необходимо определить сумму МДС всех участков

Таблица 8-19

Расчет характеристики намагничивания машины

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0{,}5\Phi_{\delta н}$	$0{,}75\Phi_{\delta н}$	$0{,}9\Phi_{\delta н}$	$\Phi_{\delta н}$	$1{,}1\Phi_{\delta н}$	$1{,}15\Phi_{\delta н}$
1	ЭДС	E	В						
2	Магнитный поток	$\Phi_\delta = \frac{60aE}{pNn}$	Вб						
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_\delta \tau l_\delta}$	Тл						
4	МДС воздушного зазора	$F_\delta = 0{,}8 L_\delta B_\delta \cdot 10^6$	А						
5	Магнитная индукция в зубцах якоря *	$B_{z1} = k_{z1} B_\delta$ $B_{z2} = k_{z2} B_\delta$ $B_{z3} = k_{z3} B_\delta$	Тл Тл Тл						
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря (по табл. П-20)	H_{z1} H_{z2} H_{z3}	А/м А/м А/м						
7	Средняя напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{zср} = \frac{H_{z1}+4H_{z2}+H_{z3}}{6}$	А/м						
8	Магнитное напряжение зубцов	$F_z = L_Z H_{zср}$	А						
9	Магнитная индукция в спинке якоря (см. табл. 8-18)	$B_j = \Phi_\delta / 2S_j$	Тл						
10	Напряженность магнитного поля в спинке якоря (по табл. П-19)	H_j	А/м						
11	Магнитное напряжение спинки якоря	$F_j = L_j H_j$	А						
12	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_г = \sigma_г \Phi_\delta$	Вб						
13	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_г = \Phi_г / S_г$	Тл						
14	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса	$H_г$	А/м						
15	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_г = L_г H_г$	А						
16	Магнитная индукция в зубцах наконечника главного полюса (компенсационной обмотки)	$B_{zк} = \frac{\sigma_г \Phi_\delta}{S_{к,н}}$	Тл						

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta н}$	$0,75\Phi_{\delta н}$	$0,9\Phi_{\delta н}$	$\Phi_{\delta н}$	$1,1\Phi_{\delta н}$	$1,15\Phi_{\delta н}$
17	Напряженность магнитного поля в зубцах компенсационной обмотки	$H_{zк}$	А/м						
18	Магнитное напряжение зубцов наконечника главного полюса	$F_{н.к} = L_{н.к} H_{zк}$	А						
19	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{с.п} = B_г$	Тл						
20	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{с.п} = 0,8 L_{с.п} B_г \cdot 10^6$	А						
21	Магнитная индукция в станине	$B_с = \dfrac{\sigma_г \Phi_\delta}{2S_с}$	Тл						
22	Напряженность магнитного поля в станине	$H_с$	А/м						
23	Магнитное напряжение станины	$F_с = L_с H_с$	А						
24	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\delta + F_z + F_j + F_г + F_{zк} + F_{с.п} + F_с = F_\Sigma$	А						
25	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_z + F_j = F_{\delta z j}$	А						

Примечание. При определении магнитного напряжения зубцового слоя следует определять напряженность магнитного поля по кривым приложения II, которые построены при $B_z > 1,8$ Тл с учетом вытеснения магнитного поля в паз.

Для открытых пазов (см. рис. 8-13)

$$k_{z1} = \frac{t_1}{b_{z1}} \frac{l_\delta}{l_a k_с}; \quad k_{z2} = \frac{t_1}{b_{z2}} \frac{l_\delta}{l_a k_с}; \quad k_{z3} = \frac{t_1}{b_{z3}} \frac{l_\delta}{l_a k_с}; \tag{8-62}$$

для овальных пазов (см. рис. 8-11)

$$k_{z1} = \frac{t_1}{b_{z1}} \frac{l_\delta}{l_a k_с}; \quad k_{z2} = \frac{t_2}{b_z} \frac{l_\delta}{l_a k_с}; \quad k_{z3} = \frac{t_3}{b_z} \frac{l_\delta}{l_a k_с}. \tag{8-63}$$

магнитной цепи при значениях магнитного потока в воздушном зазоре $\Phi_\delta = 0,5$; 0,75; 0,9; 1,1 и 1,15 $\Phi_{\delta н}$. Расчет характеристики намагничивания производится по приведенной в табл. 8-19 форме.

По данным табл. 8-19 строят характеристику намагничивания машины постоянного тока $B_\delta = f(F_\Sigma)$ и переходную характеристику

$$B_\delta = \varphi(F_{\delta z i}). \tag{8-62}$$

8-7. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитодвижущая сила обмоток параллельного или независимо-

Таблица 8-20

Размер проводов, марка провода и тип обмотки возбуждения

Сечение, м²	Марка провода	Тип обмотки
$<8\cdot10^{-6}$	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники круглого сечения
$(8—25)\cdot10^{-6}$	ПЭТВП, ПЭТП-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники прямоугольного сечения с отношением сторон 1,4—1,8
$>25\cdot10^{-6}$	Голая шинная медь	Однослойная по ширине катушка с намоткой меди на ребро

го возбуждения на один полюс при нагрузке, А,

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} \pm F_d - F_c, \quad (8\text{-}63)$$

где F_d — продольная составляющая реакции якоря, возникающая при сдвиге щеток с геометрической

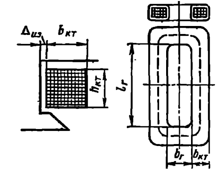


Рис. 8-25. К определению размеров катушек главных полюсов.

нейтрали на относительную дугу $x: F_d = A\cdot 2x$;

F_c — МДС стабилизирующей обмотки;

Средняя длина витка обмотки главного полюса (рис. 8-25), м,

$$l_{в,ср} = 2(l_г + b_г) + \pi(b_{к,г} + 2\Delta_{ио}), \quad (8\text{-}64)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки по табл. 8-7—8-9 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0,5—0,8)\cdot10^{-3}$ при диаметрах якоря до 0,5 м.

Площадь сечения проводника обмотки при последовательном соединении катушек, м²,

$$q_в = \frac{\rho_\vartheta k_з\cdot 2pF_в\, l_{в,ср}}{U_в}, \quad (8\text{-}65)$$

где $k_з$ — коэффициент запаса МДС обмотки возбуждения: $k_з = 1,1 \div 1,2$.

Марка и размеры проводов обмоток возбуждения выбираются в соответствии с табл. 8-20.

Многослойные катушки из проводников круглого сечения выполняются сплошными. Размеры катушек (рис. 8-25) ориентировочно могут быть приняты в зависимости от диаметра якоря:

D, м . . .	0,09	0,106	0,110	0,132	0,156	0,180
$b_{кт}\times h_{кт}$, м	0,023×0,019	0,032×0,018	0,024×0,023	0,025×0,03	0,025×0,038	0,03×0,04

F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

При компенсации реакции якоря компенсационной обмоткой составляющая F_{qd} принимается равной нулю.

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 8-7—8-9.

Катушки обмоток возбуждения машин с диаметром якоря свыше 0,2 м выполняются секционированными (см. табл. 8-8, 8-9). Это увеличивает поверхность охлаждения обмоток и позволяет повысить плотность тока в обмотке возбуждения.

Проводники прямоугольного сечения и проводники из шинной ме-

ди наматываются плашмя, меньшей стороной сечения проводника по высоте катушки.

Для расчета числа витков обмотки необходимо задаться плотностью тока $J_в$ в обмотке возбуждения. Средние значения $J_в$ машин постоянного тока могут быть приняты $(2—3)\cdot 10^6$ А/м² при исполнении IP44 и $(4,5—6)\cdot 10^6$ А/м² при исполнении IP22.

Число витков обмотки на один полюс

$$w_п = F_п/J_в q_п, \quad (8\text{-}66)$$

где $J_в q_п = I_{п,н}$ — номинальный ток возбуждения.

При укладке обмотки в междуполюсном окне необходимо обеспечить воздушные промежутки между краями главных и дополнительных полюсов и выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины не менее $(6—8)\cdot 10^{-3}$ м.

Площадь сечения катушки равна:

$$S_{кт} = w_п d_{из}^2/k_{з,п}, \quad (8\text{-}67)$$

где $d_{из}$ — диаметр изолированного провода (при проводах прямоугольного сечения необходимо вместо $d_{из}$ ввести $a_{пр}\times b_{пр}$);

$k_{з,в}$ — коэффициент заполнения, определяющий разбухание катушек.

Окончательные размеры катушек обмоток возбуждения устанавливаются после размещения в междуполюсном окне главных и добавочных полюсов. Если площадь междуполюсного окна не позволяет разместить обмотки, то необходимо увеличить внутренний диаметр станины.

Сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$R_п = \rho_\vartheta 2pw_п l_{п,ср}/q_п. \quad (8\text{-}68)$$

Масса меди параллельной обмотки

$$m_{м,п} = 19{,}6pl_{п,ср} m_п q_п. \quad (8\text{-}69)$$

Максимальный ток обмотки возбуждения, А,

$$I_{в\,max} = U_п/R_п. \quad (8\text{-}70)$$

Коэффициент запаса

$$k_з = I_{п\,max} w_п/F_п; \quad (8\text{-}71)$$

$k_з$ должен быть не менее 1,1.

На главных полюсах машин без компенсационных обмоток кроме обмоток параллельного или независимого возбуждения с целью повышения устойчивости работы двигателя и частичной компенсации реакции якоря устанавливают стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и обмоткой добавочных полюсов.

Конструктивно стабилизирующая обмотка располагается либо у полюсного наконечника, либо между секциями катушек главных полюсов, при этом она одновременно выполняет роль дистанционной прокладки.

Плотность тока $J_с$ стабилизирующей обмотки принимается такой же, как и в обмотках главных полюсов.

Число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки принимается равным числу ветвей компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Число витков на один полюс стабилизирующей обмотки

$$w_с = F_{qd} a_д/I, \quad (8\text{-}72)$$

где F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря, А;

I — ток якоря, А;

$a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Полученное число витков округляют до ближайшего целого числа.

Марка провода и конструкция обмотки выбираются согласно табл. 8-20.

Средняя длина витка обмотки

$$l_{с,ср} = 2(l_г + b_г) + \pi(b_{кт.с} + 2\Delta_{из}), \quad (8\text{-}73)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки согласно табл. 8-7—8-9 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0{,}5—0{,}8)\cdot 10^{-3}$ при диаметрах якоря до 0,5 м;

$b_{кт.с}$ — ширина катушки, которая определяется после выбора марки провода и размещения обмотки в междуполюсном окне.

Сопротивление стабилизирующей обмотки, Ом,

$$R_c = \rho_\vartheta \frac{2pw_c l_{c.cp}}{q_c}. \qquad (8\text{-}74)$$

8-8. РАСЧЕТ КОММУТАЦИИ

Процесс коммутации в машинах постоянного тока, в основе которого лежит процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую, сопровождается сложным комплексом взаимодействующих между собой электромагнитных, механических и других процессов в секции и щеточном контакте. Точный учет этих процессов представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому в конструкции каждой машины предусматриваются конструктивные меры, позволяющие выполнить экспериментальную настройку коммутации, в частности путем изменения числа витков обмотки добавочных полюсов, регулировки воздушного зазора в цепи добавочных полюсов, подбора марки щеток и т. д.

В настоящее время критерием оценки коммутации машин постоянного тока является визуальная оценка степени искрения на коллекторе. ГОСТ 183-74 устанавливает, что при номинальном режиме работы машины степень искрения не должна превышать класса 1,5. При этом классе наблюдается слабое точечное искрение под большей частью электрощетки, которое, однако, не оказывает существенного влияния на срок службы коллекторно-щеточного узла электрической машины.

Косвенным критерием оценки коммутационной напряженности является реактивная ЭДС E_p, которая индуктируется в секции в процессе коммутации, когда секция замкнута щеткой накоротко.

Для машин с высотой оси вращения до 200 мм ЭДС E_p не должна превышать 2,5—3,5 В. В машинах с высотой оси вращения до 355 мм максимально допустимая $E_{p max}$ может достигать 5 В, в крупных машинах с компенсационной обмоткой и лягушачьей обмоткой на якоре допускается $E_{p max}$ до 12 В.

Реактивная ЭДС коммутируемой секции, В,

$$E_p = 2w_c l_\delta A v_a \lambda \cdot 10^{-2}, \qquad (8\text{-}75)$$

где w_c — число витков в секции;

l_δ — длина якоря, м;

A — линейная нагрузка, А/м;

$v_a = \pi D n_н/60$ — окружная скорость, м/с;

λ — приведенная удельная магнитная проводимость пазового рассеяния.

Для овальных полузакрытых пазов (см. рис. 8-11)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_п}{2r_2} + \frac{h_ш}{b_ш} + \frac{l_л}{l_a} + \frac{2{,}5\cdot 10^5}{w_c l_a A v_a}\frac{a}{p}; \qquad (8\text{-}76)$$

для прямоугольных пазов (см. рис. 8-13 и 8-14)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_п}{b_п} + \frac{l_л}{l_a} + \frac{2{,}5\cdot 10^6}{w_c l_a A v_a}\frac{a}{p}. \qquad (8\text{-}77)$$

Так как активные стороны секций вступают в процесс коммутации не одновременно, а через определенные интервалы времени, зависящие от ширины щетки, коэффициента укорочения обмотки, числа секционных сторон в пазу и т. д., то расчет результирующей проводимости пазового рассеяния представляет собой довольно трудоемкую задачу.

Формулы (8-76) и (8-77) обеспечивают достаточную точность расчета коммутации машин постоянного тока общего назначения, когда диаметр якоря не превышает 0,3—0,32 м и при сравнительно не напряженных условиях коммутации. Для расчета коммутации напряженных в коммутационном отношении машин и при диаметрах якоря свыше 0,3 м используют зависимости, учитывающие средний за период коммутации эффект индуктивного взаимодействия секций. В этом случае средний результирующий коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния

$$\lambda'_п = \frac{4u'}{2\gamma''}(\lambda_ц + \lambda_к) + \lambda_л \frac{l_л}{l_a}. \qquad (8\text{-}78)$$

Здесь коэффициент $4u'$ принимается по рис. 8-26;

$$\lambda_п = 1,25\frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_2}{b_п}, \quad (8\text{-}79а)$$

где размеры h_1, h_2, $b_п$ — по рис. 8-27;

$$\lambda_{к.д} = b_{z1}/2\delta_д \quad (8\text{-}79б)$$

b_{z1} — по рис. 8-14;

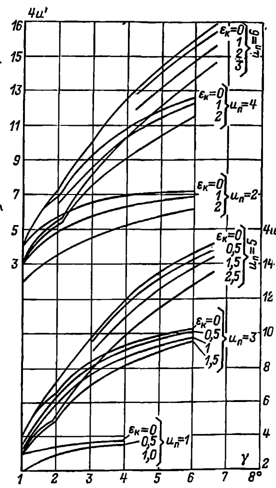


Рис. 8-26. К расчету результирующего коэффициента проводимости пазового рассеяния.

$\delta_д$ — воздушный зазор под дополнительным полюсом, предварительно принимается $\delta_д \approx 0,02D$;

$\lambda_л = 0,75$ при бандажах на лобовой части обмотки якоря из магнитной проволоки и $\lambda_л = 0,5$ при стеклобандажах и бандажах из немагнитной проволоки;

γ'' — относительная ширина щетки, определяющая число одновременно коммутируемых секций:

$$\gamma'' = \frac{b_щ}{t_к} + \left(1 + \frac{a}{p}\right), \quad (8\text{-}80)$$

где $t_к$ — коллекторное деление.

При расчете $\lambda_п'$ по (8-78)—(8-80) необходимо предварительно выбрать ширину щетки. Ширина щетки принимается $b_щ = (2 \div 4)t_к$ при простых волновых обмотках, $b_щ = (u_п + 0,5)t_к$ при простых петлевых обмотках и $b_щ > 3t_к$ при двухходовых петлевых обмотках.

Ширина щетки $b_щ$ определяет ширину зоны коммутации $b_{з,к}$, т. е.

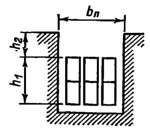


Рис. 8-27. Расчетные размеры паза.

ширину дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции:

$$b_{з,к} = \left(\frac{b_щ}{t_к} + u_п - \frac{a}{p} + \varepsilon_к\right) t_к \frac{D}{D_к}. \quad (8\text{-}81)$$

Диаметр коллектора $D_к$, коллекторное деление $t_к$, а также $u_п$ выбирают согласно § 8-4; укорочение обмотки в коллекторных делениях $\varepsilon_к = \frac{K}{2p} - y_1$ принимается всегда со знаком плюс. Ширина щетки должна обеспечить ширину зоны коммутации:

$$b_{з,к} \leqslant (0,55 \div 0,7)(\tau - b_p), \quad (8\text{-}82)$$

где $\tau - b_p = b_{н,з}$.

Верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 0,2 м, нижние значения принимаются при диаметрах якоря выше 0,4 м. При отсутствии добавочных полюсов в машинах малой мощности отношение $b_{з,к}/(\tau - b_р)$ можно выбирать в пределах 0,8—1,25.

Принятое значение ширины щетки округляется до ближайшего стандартного размера $b_щ$ (см. табл. П-34).

Выбор марки щеток для машин постоянного тока — весьма сложная задача, так как от марки щеток зависят коммутация машины и срок службы коллекторно-щеточного узла.

На практике марку щеток определяют в соответствии с условиями работы согласно табл. П-35, где приведены основные технические данные наиболее распространенных марок щеток и области их применения.

Контактная площадь всех щеток, м^2,

$$\Sigma S_{щ} = \frac{2I_{н}}{J_{щ}} \cdot 10^{-4}, \qquad (8\text{-}83)$$

где $J_{щ}$ — плотность тока в щеточном контакте, А/см^2 (см. табл. П-35).

Контактная площадь щеток одного бракета

$$S_{щ.б} = \Sigma S_{щ}/2p. \qquad (8\text{-}84)$$

По табл. П-34 выбирают длину $l_{щ}$ одной щетки, определяют площадь щеточного контакта одной щетки $S_{щ}=b_{щ}\times l_{щ}$ и рассчитывают число щеток на один щеточный болт:

$$\frac{S_{щ.б}}{S_{щ}} = N_{щ}. \qquad (8\text{-}85)$$

По выбранным размерам щеток $b_{щ}$, $l_{щ}$ и $N_{щ}$ определяют фактическую контактную площадь и уточняют плотность тока в щеточном контакте $J_{щ}$.

Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток по длине коллектора, м,

$$l_{к} = N_{щ}(l_{щ} + 0{,}008) + 0{,}01, \qquad (8\text{-}86)$$

где $l_{щ}$ — длина щетки, м.

Механический расчет коллекторов приведен в гл. 9.

8-9. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов должна создать в зоне коммутации магнитное поле, индуктирующее в коммутируемой секции ЭДС коммутации $E_{к}$, направленную встречно к реактивной ЭДС $E_{р}$. Электродвижущая сила $E_{к}$ должна быть несколько больше $E_{р}$, чтобы процесс коммутации протекал с некоторым ускорением. При расчете индукции в воздушном зазоре под добавочными полюсами $B_{δд}$ принимают расчетное значение реактивной ЭДС $E'_{р} = (1{,}05\div1{,}1)E_{р}$.

В этом случае индукция $B_{δд}$ равна, Тл:

$$B_{δд} = \frac{E'_{р}}{2w_{с}\, l_{δ}\, v_{a}}. \qquad (8\text{-}87)$$

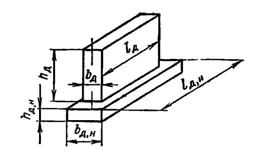


Рис. 8-28. Размеры добавочного полюса.

Ширина наконечника добавочного полюса $b_{д,н}$ (рис. 8-28), м,

$$b_{д,н} \leqslant (0{,}55 \div 0{,}75)\, b_{з,к}. \qquad (8\text{-}88)$$

Длину наконечника добавочного полюса $l_{д,н}$ принимают равной длине якоря $l_{д,н}=l_{a}$. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре в зоне коммутации, Вб,

$$\Phi_{δд} = B_{δд}\, b'_{д.н}\, l_{д.н}, \qquad (8\text{-}89)$$

где $b'_{д,н} = b_{д,н} + 2δ_{д}$ — расчетная ширина полюсного наконечника добавочного полюса.

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб,

$$\Phi_{д} = σ_{д}\Phi_{δд}, \qquad (8\text{-}90)$$

где $σ_{д}$ — коэффициент рассеяния добавочных полюсов; $σ_{д}=2{,}5\div3{,}5$ для машин без компенсационной обмотки, $σ_{д}=2$ для машин с компенсационной обмоткой.

Ширину сердечника добавочного полюса $b_{д}$ предварительно определяют по зависимости на рис. 8-29, *а*. Длину сердечника добавочного полюса $l_{д}$ принимают равной длине якоря; для машин с диаметром якоря до 0,132 м длина $l_{д}$ короче длины полюсного наконечника на $(5—10)\cdot10^{-3}$ м.

Таблица 8-21

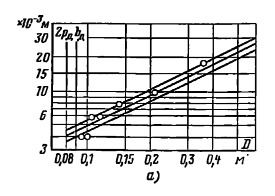
Расчет МДС обмотки добавочных полюсов

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta д}$	Вб	
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta д} = \dfrac{\Phi_{\delta д}}{b_д l_п}$	Тл	
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0,8\delta_д k_{\delta д} B_{\delta д}\cdot 10^6$	А	
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{z1} = k_{z1} B_{\delta д}$	Тл	
		$B_{z2} = k_{z2} B_{\delta д}$	Тл	
		$B_{z3} = k_{z3} B_{\delta д}$	Тл	
5	Напряженности магнитного поля в зубцах якоря по табл. П-20	H_{z1}	А/м	
		H_{z2}	А/м	
		H_{z3}	А/м	
6	Средняя напряженность поля в зубцах	$H_{zср} = \dfrac{H_{z1} + 4H_{z2} + H_{z3}}{6}$	А/м	
7	Магнитное напряжение зубцов	$F_z = L_z H_{zср}$	А/м	
8	Магнитная индукция в спинке ярма:			
	на участке согласного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \dfrac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	
	на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j2} = \dfrac{\Phi_\delta - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	
9	Напряженность магнитного поля:			
	на участке с индукцией B_{j1}	H_{j1}	А/м	
	на участке с индукцией B_{j2}	H_{j2}	А/м	
	средняя напряженность магнитного поля в ярме	$H_{jср} = \dfrac{H_{j1} - H_{j2}}{2}$	А/м	
10	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = H_{jср} L_j$	А	
11	Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	Вб	
12	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{с.д} = \dfrac{\Phi_д}{b_д l_п}$	Тл	
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	Тл	
14	Магнитное напряжение в сердечнике добавочного полюса	$F_{с.д} = H_{с.д} h_д$	А	
15	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом	$F_{\delta д2} = 0,8 B_д \delta_{д2}\cdot 10^6$	А	
16	Магнитная индукция в станине:			
	на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{с1} = \dfrac{\Phi_г + \Phi_д}{2S_с}$	Тл	
	на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{с2} = \dfrac{\Phi_г - \Phi_д}{2S_с}$	Тл	

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
17	Напряженность магнитного поля в станине: на участке с индукцией B_{c1}	H_{c1}	А/м	
	на участке с индукцией B_{c2}	H_{c2}	А/м	
18	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{c.ср} = \frac{H_{c1} - H_{c2}}{2}$	А/м	
19	Магнитное напряжение участка станины	$F_c = H_{c.ср} L_c$	А	
20	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_z + F_j + F_{с.д} + F_{\delta д1} + F_c$	А	
21	МДС обмотки добавочного полюса	$F_д = F_{д\Sigma} + \frac{A\tau}{2}$	А	

Индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл,

$$B_{с.д} = \frac{\Phi_д}{b_д l_д}. \qquad (8\text{-}91)$$



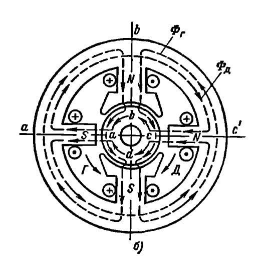


Рис. 8-29. К расчету магнитной цепи добавочных полюсов.

а — зависимость ширины добавочных полюсов от диаметра якоря; *б* — магнитные цепи главных и добавочных полюсов.

Она не должна превышать 1,6 Тл.

Сердечники добавочных полюсов выполняют из Ст3 при диаметрах якоря до 0,16 м, при бо́льших диаметрах — из листов электротехнической стали марки 3411 толщиной 1,0 мм. В зависимости от отношения ширины полюсного наконечника к ширине сердечника форма поперечного сечения дополнительного полюса может быть прямоугольной (рис. 8-28) и прямоугольной со скошенным наконечником при $b_{д.н} < b_д$.

Для расчета МДС обмотки добавочных полюсов необходимо определить магнитные напряжения отдельных участков и полную МДС магнитной цепи на один полюс в соответствии с табл. 8-21.

Распределение магнитных потоков главных полюсов $\Phi_г$ и добавочных полюсов $\Phi_д$ в магнитной системе машины показано на рис. 8-29, *б*.

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов для машин постоянного тока без компенсационной обмотки находится в пределах

$$F_д = (1,2 \div 1,4) A \frac{\tau}{2}. \qquad (8\text{-}92)$$

Число витков обмотки на один добавочный полюс

$$w_д = \frac{F_д a_д}{I}, \qquad (8\text{-}93)$$

где $a_д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса,

обычно $a_д=1$; при наличии компенсационной обмотки равно числу параллельных ветвей компенсационной обмотки; число витков округляется до ближайшего целого числа.

Сечение провода обмотки добавочных полюсов, м^2,

$$q_д = \frac{I}{a_д J_д}. \qquad (8\text{-}94)$$

Средние значения $J_д$ машин постоянного тока при исполнении IP44 могут быть приняты $(2—3)\times\times10^6$ А/м^2, при исполнении IP22—$(4{,}5—6{,}5)\cdot10^6$ А/м^2.

Марка провода и тип обмотки добавочных полюсов выбираются согласно рекомендациям табл. 8-20. По выбранному стандартному сечению проводника уточняется плотность тока $J_д$.

После проверки размещения катушек главных и добавочных полюсов с учетом принятых припусков на разбухание катушек (см. § 8-7) определяют окончательные размеры витка катушки, м:

$$l_{д.ср}=2(b_д+l_д)+\pi(b_{кт.д}+2\Delta_{из}), \qquad (8\text{-}95)$$

где $b_д$ и $l_д$ — ширина и длина сердечника добавочного полюса;

$b_{кт.д}$ — ширина катушки добавочного полюса;

$\Delta_{из}$ — односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника; $\Delta_{из}=(1{,}7\div\div2{,}2)\cdot10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 0,5 м.

Сопротивление обмотки добавочного полюса в холодном состоянии, Ом,

$$R_д = \rho_\vartheta \frac{2p_д l_{д.ср} w_д}{q_д a_д^2}. \qquad (8\text{-}96)$$

Масса меди обмотки добавочных полюсов

$$m_д=8900\, l_{д.ср} w_д\cdot 2p_д q_д. \qquad (8\text{-}96а)$$

8-10. ПОТЕРИ И КПД. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент полезного действия машины, %,

$$\eta = \frac{P_н}{P_1}100 = \frac{P_н}{P_н+\Sigma P}100, \qquad (8\text{-}97)$$

где $P_н$ — номинальная полезная мощность машины, кВт;

ΣP — сумма потерь в машине, кВт;

P_1 — потребляемая мощность, кВт.

Сумма потерь в машине в общем случае, кВт,

$$\Sigma P = P_{эа}+P_{э.с}+P_{э.в}+P_{э.д}+P_{э.к}+ + P_щ + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}, \qquad (8\text{-}98)$$

где $P_{эа}$ — электрические потери в обмотке якоря;

$P_{э.с}$ — электрические потери в стабилизирующей обмотке;

$P_{э.в}$ — электрические потери в обмотке параллельного возбуждения;

$P_{э.д}$ — электрические потери в обмотке добавочных полюсов;

$P_{э.к}$ — электрические потери в компенсационной обмотке;

$P_щ$ — электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе;

$P_{ст}$ — магнитные потери в стали якоря;

$P_{мех}$ — суммарные механические потери;

$P_{доб}$ — добавочные потери.

Электрические потери в обмотке якоря, кВт,

$$P_{эа} = I^2 R_a\cdot10^{-3}. \qquad (8\text{-}99)$$

Электрические потери в стабилизирующей обмотке, кВт,

$$P_{э.с} = I^2 R_с\cdot10^{-3}. \qquad (8\text{-}100)$$

Электрические потери в цепи обмотки параллельного возбуждения, кВт,

$$P_{э.в} = I_в^2 R_в\cdot10^{-3} = \frac{U_в^2}{R_в}10^{-3}, \qquad (8\text{-}101)$$

где $U_в$ — напряжение на выводах обмотки возбуждения.

Электрические потери в обмотке добавочных полюсов, кВт,

$$P_{э.д} = I^2 R_д\cdot10^{-3}. \qquad (8\text{-}102)$$

Электрические потери в компенсационной обмотке, кВт,

$$P_{э.к} = I^2 R_к\cdot10^{-3}. \qquad (8\text{-}103)$$

Электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе, кВт,

$$P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I \cdot 10^{-3}. \quad (8\text{-}104)$$

Значение $2\Delta U_{щ}$ определяется для конкретной марки щеток по табл. П-35.

Магнитные потери в стали зубцов и ярма якоря, кВт,

$$P_{ст} = 2{,}3 p_{1{,}0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \times$$

$$\times \left(B_z^2 m_z + B_j^2 m_j\right). \quad (8\text{-}105)$$

Масса стали зубцов якоря с овальными пазами, кг,

$$m_z = 7800\, Z b_z \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_\delta k_c. \quad (8\text{-}106)$$

Масса стали зубцов с прямоугольными пазами, кг,

$$m_z = 7800\, Z b_{z\,ср} h_п\, l_\delta k_c. \quad (8\text{-}107)$$

Масса стали спинки ярма, кг,

$$m_j = 7800 \frac{\pi \left[(D - 2h_п)^2 - D_0^2\right]}{4} l_\delta k_c. \quad (8\text{-}108)$$

При наличии аксиальных каналов в спинке ярма при расчете массы необходимо учитывать уменьшение площади сечения стали ярма на площадь поперечного сечения всех каналов.

Суммарные механические потери, кВт,

$$P_{мех} = P_{т,щ} + P_{вент} + P_{т,п}, \quad (8\text{-}109)$$

где $P_{т,щ}$ — потери на трение щеток о коллектор;

$P_{вент} + P_{т,п}$ — потери на вентиляцию и трение в подшипниках.

При средних значениях удельного нажатия на щетку $3 \cdot 10^4$ Па (0,3 кгс/см^2) и коэффициенте трения щеток о коллектор, равном 0,25, потери на трение щеток о коллектор, кВт,

$$P_{т,щ} = 7{,}5\, \Sigma S_{щ} v_к, \quad (8\text{-}110)$$

где $\Sigma S_{щ}$ — суммарная площадь контакта всех щеток, м^2;

$v_к$ — окружная скорость коллектора, м/с.

Средние значения потерь $P_{вент} + P_{т,п}$ можно определить по рис. 8-30. Семейство кривых A на этом рисунке относится к машинам с вентиляторами, установленными на валу машины, семейство кривых $Б$ — к машинам, приводные двигатели вентиляторов которых не установлены на машинах.

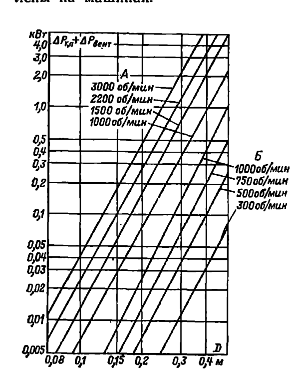


Рис. 8-30. Потери на вентиляцию и в подшипниках.

Добавочные потери при номинальной нагрузке, кВт:

для некомпенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}01 \frac{P_н}{\eta_н}; \quad (8\text{-}111)$$

для компенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}005 \frac{P_н}{\eta_н}, \quad (8\text{-}112)$$

где $\eta_н$ — предварительное значение КПД по рис. 8-6.

При номинальной нагрузке КПД определяется в следующем порядке.

Задают значения тока якоря $I \approx 0{,}1 I_н$; $I \approx 0{,}25 I_н$; $I \approx 0{,}5 I_н$; $I \approx 0{,}75 I_н$; $I \approx 1{,}0 I_н$; $I \approx 1{,}25 I_н$.

Для каждого значения тока определяют мощность, кВт:

$$P_1 = U_н I \cdot 10^{-3} + U_в I_{в.н} \cdot 10^{-3}. \quad (8\text{-}113)$$

Рассчитывают суммарные потери ΣP. Для каждого значения тока

определяют полезную мощность на валу P_2 и по (8-97) определяют КПД.

Строят зависимость $P_2=f(I)$, $\eta=\varphi(I)$ и для номинального значения $P_{2н}$ определяют номинальное значение тока якоря $I_н$ и номинальный КПД $\eta_н$.

Электромагнитная мощность при номинальном значении тока якоря

$$P' = P_1 - P_{эа} - P_{э,с} - - P_{э,д} - P_{э,к} - P_{щ}. \quad (8\text{-}114)$$

Номинальное значение ЭДС, В,

$$E_н = P'/I_н. \quad (8\text{-}115)$$

Номинальное значение магнитного потока $\Phi_{δн}$ и суммарную МДС $F_{\Sigma н}$ определяют по характеристике холостого хода машины; по переходной характеристике рассчитывают размагничивающее действие реакции якоря F_{qd}.

Номинальная частота вращения, об/мин,

$$n_н = \frac{60E_н}{(p/a)\,N\Phi_{δн}}. \quad (8\text{-}116)$$

Номинальный ток обмотки параллельного возбуждения

$$I_{в,н} = \frac{F_{\Sigma} - F_с + F_{qd}}{w_в}. \quad (8\text{-}117)$$

Вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

$$M = \frac{9{,}57\cdot 10^3 P_2}{n}. \quad (8\text{-}118)$$

Ток двигателя

$$I_{1н} = I_н + I_{в,н}. \quad (8\text{-}119)$$

Зависимости M, n, η, I от полезной мощности на валу P_2 определяют рабочие характеристики двигателя.

При расчете рабочих характеристик генераторов принимается частота вращения якоря n=const.

Напряжение на выводах генератора, В, определяется из основного уравнения напряжения

$$U = E - I(R_a + R_к + R_с + + R_д) - 2\Delta U_щ, \quad (8\text{-}120)$$

где E — ЭДС обмотки якоря;

R_a, $R_к$, $R_с$, $R_д$ — сопротивления, определяются по (8-26), (8-51), (8-74) и (8-96) соответственно;

$2\Delta U_щ$ — падение напряжения в щеточном контакте, принимается согласно приложению IV.

Однако E в (8-120) является сложной функцией тока якоря I, тока возбуждения $I_в$ и состояния магнитной цепи машины. Для определения ЭДС E необходимо задаться током возбуждения $I_в$ и током якоря I, рассчитать результирующую МДС согласно (8-64):

$$F_{\Sigma} = F_в - F_{qd} \pm F_d + F_с. \quad (8\text{-}121)$$

По характеристике намагничивания, построенной согласно табл. 8-19, определяется ЭДС E.

Если при указанных расчетах напряжение на выводах генератора U=const, а рассчитывается зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_в=f(I)$, то полученная характеристика называется регулировочной.

Если принимается полное сопротивление в цепи обмотки возбуждения $r_{в\Sigma}$=const и определяется зависимость напряжения U на выводах машины от тока нагрузки: $U=f(I)$, то полученная характеристика является внешней характеристикой генератора. В этом случае МДС в (8-121) $F_в = \frac{U}{r_{в\Sigma}} w_в$, где $w_в$ — число витков обмотки возбуждения.

Путем расчета серии внешних характеристик для нескольких значений $r_{в\Sigma}$ можно построить нагрузочную характеристику, дающую зависимость напряжения U на выводах машины от тока возбуждения $I_в$ для принятого значения тока нагрузки.

8-11. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тепловой и вентиляционный расчеты машин постоянного тока основываются на общих принципах расчета тепловых и вентиляционных схем электрических машин, изложенных в гл. 5.

Для приближенной оценки тепловой напряженности машины достаточно определить превышения температуры отдельных ее актив-

ных частей при выбранных электромагнитных нагрузках и геометрических размерах.

Обычно рассчитывают средние превышения температуры обмоток якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной, а также поверхности коллектора.

Эти превышения температуры с учетом приближенного расчета должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183-74, не менее чем на 10%.

При расчете средних превышений температуры активных частей машины необходимо сопротивления обмоток привести к предельным допускаемым температурам для выбранного класса нагревостойкости изоляции. Для этого сопротивления, вычисленные при расчете рабочих характеристик, необходимо умножить на коэффициент $k_т$. При классе нагревостойкости изоляции B $k_т=1,15$, при классе нагревостойкости F $k_т=1,07$, при классе нагревостойкости H $k_т=1,145$.

Вентиляционный расчет машин постоянного тока также выполняют с использованием средних значений аэродинамических сопротивлений и конструктивных размеров вентиляционных устройств серийных машин.

Для теплового и вентиляционного расчетов машины необходимо установить мощности тепловых потоков, площади отдельных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи с этих поверхностей.

Потери мощности в обмотках с учетом поправочного коэффициента $k_т$, Вт:

$P_{ат}=k_т I_н^2 R_a$ — в обмотке якоря;

$P_{д,т}=k_т I_н^2 R_д$ — в обмотке добавочных полюсов;

$P_{к,т}=k_т I_н^2 R_к$ — в компенсационной обмотке;

$P_{с,т}=k_т I_н^2 R_с$ — в стабилизирующей обмотке;

$P_{в,т}=k_т I_{в,н}^2 R_в$ — в обмотке возбуждения.

Расчетные значения потерь в обмотках принимают при номинальных токах якоря и возбуждения.

Для расчета потерь, отводимых охлаждающим внутренние объемы машины воздухом и наружной поверхностью машины, принимают, что через наружную поверхность отводится часть потерь обмоток возбуждения, стабилизирующей, добавочных полюсов и компенсационной, равная:

при исполнениях по степени защиты и способу охлаждения IP22, IC01, IP22, IC17, IP44, IC37

$$P_{нар}=0,1\left(P_{в,т}+P_{с,т}+P_{д,т}+P_{к,т}\right); \qquad (8\text{-}122)$$

при исполнении IP44, IC0041

$$P_{нар}=0,3\left(P_{в,т}+P_{с,т}+P_{д,т}+P_{к,т}\right); \qquad (8\text{-}123)$$

при исполнении IP44, IC0141

$$P_{нар}=0,4\left(P_{в,т}+P_{с,т}+P_{д,т}+P_{к,т}\right). \qquad (8\text{-}124)$$

Потери, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины, составляют:

$$\Sigma P'=\Sigma P-P_{нар}, \qquad (8\text{-}125)$$

где $\Sigma P=P_1-P_н$, а при исполнении IP44 $\Sigma P=P_1-P_н-\Delta(P_{т.п}+P_{вент})$.

Соответственно потери P_i', отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины через поверхность i-й обмотки главных и добавочных полюсов, в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения согласно (8-122)—(8-124) составляют: $0,9P_i$; $0,7P_i$; $0,6P_i$.

При расчете среднего превышения температуры компенсационной обмотки необходимо учесть и добавочные потери, возникающие в полюсных наконечниках главных полюсов вследствие зубчатости наконечников. Эти потери ориентировочно равны, Вт:

$$P_{ст,п}=k_\Delta\left[\left(k_{δк}-1\right)B_δ t_к\right]^2\times\left(\frac{Zn}{10^4}\right)^{1,5}\frac{2pb_г l_г}{10^6}, \qquad (8\text{-}126)$$

где k_Δ — коэффициент, зависящий от толщины листа стали главного полюса: $k_\Delta=1,5$ при толщине листа 0,5 мм, $k_\Delta=2,8$ при толщине листа

1,0 мм и $k_\Delta=4$ при толщине листа 1,5 мм;

$k_{\delta к}$ — коэффициент воздушного зазора полюсного наконечника;

$t_к$ — зубцовый шаг паза компенсационной обмотки;

$b_г$, $l_г$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса.

Расчетные поверхности охлаждения тепловыделяющих поверхностей якоря обмоток главных и добавочных полюсов зависят от выбранной системы охлаждения (радиальной или аксиальной) и формы и размеров охлаждающих каналов, образованных поверхностями охлаждения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов.

При тепловом расчете принимают следующие формулы для расчета поверхностей охлаждения.

Поверхность охлаждения якоря, м²:

при аксиальной вентиляции

$$S_a = (\pi D + n_к d_к)(l_a - 0{,}5\Sigma l_б), \quad (8\text{-}127)$$

где $n_к$, $d_к$ — число и диаметр аксиальных вентиляционных каналов якоря;

$\Sigma l_б$ — общая длина (по длине якоря) бандажа;

при радиальной вентиляции

$$S_a = \pi D(l_a - 0{,}5\,\Sigma l_б - n_р b_р), \quad (8\text{-}128)$$

где $n_р$, $b_р$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов.

Поверхность охлаждения пазовой части обмотки якоря и компенсационной обмотки, м²,

$$S_п = ПZl_\delta k_c, \quad (8\text{-}129)$$

где $П$ — периметр поперечного сечения паза: для овального полузакрытого паза $П=\pi(r_1+r_2)+2h_1$, для прямоугольного открытого паза $П=2(b_п+h_п)$;

$l_\delta\, k_c$ — длина магнитопровода якоря (главного полюса — для компенсационной обмотки).

Поверхность охлаждения наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря, м²,

$$S_л = 2\pi D(l_{выл} - 0{,}3\,l_{б.л}), \quad (8\text{-}130)$$

где $l_{выл}$ — длина вылета лобовой части обмотки якоря: $l_{выл}=0{,}3\tau$ при $2p=2$ и $l_{выл}\approx 0{,}4\tau$ при $2p\geqslant 4$;

$\Sigma l_{б.л}$ — полная ширина бандажа лобовой части обмотки.

Поверхность изоляции лобовых частей обмотки якоря, м²,

$$2S_{из.л} = 2ZП_{из.л}\,l_л, \quad (8\text{-}131)$$

где $П_{из.л}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части: для овального полузакрытого паза $П_{из.л}=(1+\pi/2)(r_1+r_2)+h_1$; для прямоугольного открытого паза $П_{из.л}=2(b_п+h_п)$;

$l_л$ — длина лобовой части обмотки якоря, м.

Поверхность охлаждения лобовой части компенсационной обмотки, м²:

для стержневой обмотки

$$S_{к.л} = 2pN_к\,l_{к.л}(b_д + h_д); \quad (8\text{-}132)$$

для катушечной (секционной) обмотки)

$$S_{к.л} = 2pZ_к\,l_{к.л}\left(2b_{к.п} + \frac{h_{к.п}}{2}\right), \quad (8\text{-}133)$$

где $N_к$ — число стержней компенсационной обмотки на один полюс;

$b_{к.д}$, $h_{к.д}$ — ширина и высота дуги компенсационной обмотки;

$b_{к.п}$, $h_{к.п}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Поверхность охлаждения обмотки возбуждения, м²,

$$S_в = l_{в.ср}\,П_в, \quad (8\text{-}134)$$

где $l_{в.ср}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения;

$П_в$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения обмотки возбуждения. Для определения периметра $П$ по эскизу междуполюсного окна определяют длины участков контура поперечного сечения обмотки; поверхности, прилегающие к сердечнику главного полюса, не учитываются; поверхности, обращенные к каналам шириной менее 6 мм, учитываются с коэффициентом 0,5; поверхности, прилегающие к изоляционным рамкам, учитываются с коэффициентом 0,3.

Поверхность охлаждения обмотки добавочных полюсов, м²,

$$S_д = l_{д.ср}\,П_д, \quad (8\text{-}135)$$

где расчет периметра $П_д$ — поперечного сечения условной поверхности

охлаждения добавочного полюса — производят так же, как и для обмотки возбуждения.

Поверхность охлаждения коллектора, м^2,

$$S_{кол} = \pi D_к l_к, \qquad (8\text{-}136)$$

где $D_к$ и $l_к$ — диаметр и длина коллектора.

Расчетное значение наружной поверхности охлаждения двигателя, м^2,

$$S_{охл} = \pi D_н (l_\delta + 2l_{выл}), \qquad (8\text{-}137)$$

где $D_н$ — наружный диаметр станины, м;

$l_{выл}$ — вылет лобовых частей обмотки якоря, м.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности твердого тела зависит от характера течения охлаждающей среды, омывающей поверхность, конфигурации и размеров поверхности, характера покрытия и т. д.

Средние значения коэффициентов теплоотдачи с расчетных поверхностей машин постоянного тока приведены на рис. 8-31—8-33.

Превышение температуры поверхности магнитопровода якоря над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{ат}\left(\frac{2l_\delta}{l_{ср}}\right) + P_{ст}}{S_a \alpha_a}, \qquad (8\text{-}138)$$

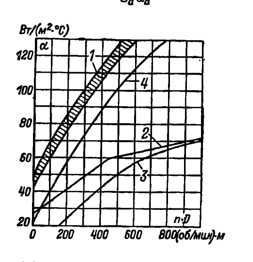


Рис. 8-31. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей при аксиальной вентиляции.

1 — якоря и лобовых частей обмоток якоря для исполнений IP22 и IP44; *2* — обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; *3* — дуг компенсационной обмотки; *4* — полюсного наконечника главного полюса в воздушный зазор.

где α_a — коэффициент теплоотдачи по рис. 8-31.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей якоря, °С,

$$\Delta\vartheta_{пов,л} = \frac{P_{ат}\left(1 - \frac{2l_\delta}{l_{аср}}\right)}{2S_л \alpha_л}. \qquad (8\text{-}139)$$

Перепад температуры в изоляции паза обмотки якоря, °С:

для овальных полузакрытых пазов

$$\Delta\vartheta_{из,п} = \frac{P_{ат}\left(\frac{2l_a}{l_{аср}}\right)}{S_п} \times \left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right), \qquad (8\text{-}140)$$

где r_1 и r_2 — размеры паза;

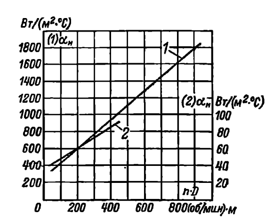


Рис. 8-32. Минимальные значения коэффициента подогрева воздуха для исполнений и способов охлаждения машины.

1 — IP22 (IC01, IC37), IP44, IC37 при $D_н < 0{,}6$ м; *2* — IP44, IC0141 при $D_н < 0{,}22$.

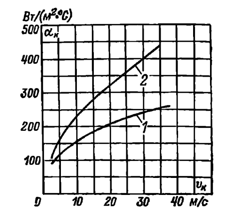


Рис. 8-33. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности коллектора.

1 — без аксиальных каналов; *2* — с аксиальными каналами.

$\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции секции из круглого провода: $\lambda'_{экв} \approx 1,4$ Вт/(м²·°С);

$\lambda_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности изоляции: для классов B, F, H $\lambda_{экв}=0,16$ Вт/(м²×°С).

Для открытых прямоугольных пазов составляющая $\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{экв}} = 0$.

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки якоря, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.л} = \frac{P_{a т}\left(1-\frac{2l_a}{l_{a ср}}\right)}{S_{п л}} \times \left(\frac{h_п}{8\lambda'_{экп}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right), \quad (8\text{-}141)$$

где $h_п$ — высота паза; для якорей с жесткими секциями из прямоугольного провода $h_п/8\lambda_{экв} \approx 0$; для якорей со всыпными обмотками без общей изоляции лобовых частей секции $\Delta b_{из}/\lambda_{экв} \approx 0$.

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{воз} = \frac{\Sigma P'}{S_{охл}\,\alpha_п}, \quad (8\text{-}142)$$

где $\alpha_п$ — коэффициент подогрева воздуха (рис. 8-32).

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{a ср} = (\Delta\vartheta_a + \Delta\vartheta_{из.п})\frac{2l_\delta}{l_{a ср}} + (\Delta\vartheta_{пов.л} + \Delta\vartheta_{из.л}) \times \left(1-\frac{2l_a}{l_{a ср}}\right) + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (8\text{-}143)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки возбуждения, °С,

$$\Delta\vartheta_в = \frac{P'_в}{2p\,S_в\,\alpha_в}, \quad (8\text{-}143а)$$

где $\alpha_в$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения (рис. 8-31).

Расчет $P'_в$ в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения приведен выше.

Перепад температуры в изоляции многослойной катушки обмотки возбуждения, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.в} = \frac{P'_в}{2pS_в}\left(\frac{b_в}{8\lambda'_{экв}} + \frac{\Delta b_{из.в}}{\lambda_{экв}}\right), \quad (8\text{-}144)$$

где $b_в$ — средняя ширина катушки;

$\lambda'_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ принимаются, как и для изоляции обмотки якоря: $\lambda'_{экв} = 1,4$ Вт/(м²·°С), $\lambda_{экв}=0,16$ Вт/(м²·°С).

Для катушек возбуждения, выполненных из проводов прямоугольного сечения, составляющая $b_в/8\lambda'_{экв} \approx 0$.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{в.ср} = \Delta\vartheta_в + \Delta\vartheta_{из.в} + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (8\text{-}145)$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_{п.д} = \frac{P'_{д.т}}{2p_д\,S_д\,\alpha_д},$$

где $\alpha_д$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности добавочного полюса: $\alpha_д=\alpha_в$.

Перепад температуры в изоляции многослойной обмотки добавочного полюса, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.д} = \frac{P'_{д.т}}{2p_д\,S_д}\left(\frac{b_{кт.д}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{\Delta b_{из.д}}{\lambda_{экв}}\right), \quad (8\text{-}146)$$

где $b_{кт.д}$ — ширина обмотки добавочного полюса;

$\lambda'_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ принимаются, как и для изоляции обмотки якоря с полузакрытыми пазами;

$$\Delta b_{из.д} = 0$$

для обмоток из прямоугольного провода.

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{д.ср} = \Delta\vartheta_д + \Delta\vartheta_{из.д} + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (8\text{-}147)$$

Превышение температуры поверхности полюсного наконечника

главного полюса, °C,

$$\Delta\vartheta_{к.п} = \frac{P_{к.т}\left(\frac{2l_г}{l_{к.ср}}\right) + P_{ст\,п}}{2pb_г\, l_г\, \alpha_{г.п}}, \quad (8\text{-}148)$$

где $\alpha_{г.п}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности главного полюса (рис. 8-31);

$b_г$, $l_г$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса, м.

Перепад температуры в пазовой изоляции компенсационной обмотки, °C,

$$\Delta\vartheta_{из,к} = \frac{P_{к.т}\,\frac{2l_г}{l_{к.ср}}\,\Delta b_{из.к}}{2pZ_к\cdot 2\,(b_{к.п}+h_{к.п})\, l_г\, \lambda_{экв}}, \quad (8\text{-}149)$$

где $\Delta b_{из.к}$ — толщина пазовой изоляции компенсационной обмотки (табл. 8-15, 8-17);

$b_{к.п}$, $h_{к.п}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Превышение температуры лобовой части компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta\vartheta_{к.л} = \frac{P_{к.т}\left(1 - \frac{2l_г}{l_{к.ср}}\right)}{S_{к.л}\,\alpha_{д.к}}, \quad (8\text{-}150)$$

где $\alpha_{д.к}$ — коэффициент теплоотдачи дуг компенсационной обмотки (рис. 8-31).

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой охлаждающего воздуха, °C,

$$\Delta\vartheta_{к.ср} = \left(\Delta\vartheta_{к.п} + \Delta\vartheta_{из.к}\right)\frac{2l_к}{l_{к.ср}} + \Delta\vartheta_{к.л}\left(1 - \frac{2l_г}{l_{к.ср}}\right) + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (8\text{-}151)$$

Превышение температуры поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, °C,

$$\Delta\vartheta_к = \frac{\Delta\,(P_щ + P_{т.щ})}{S_к\,\alpha_к}, \quad (8\text{-}152)$$

где $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора (по рис. 8-33); потери в щеточном контакте определены при расчете рабочих характеристик машины.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды, °C:

при входе охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору,

$$\Delta\vartheta_{к,ср} = \Delta\vartheta_к + 2\Delta\vartheta_{воз}; \quad (8\text{-}153а)$$

при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\vartheta_{к.ср} = \Delta\vartheta_к + \Delta\vartheta_{воз}. \quad (8\text{-}153б)$$

Расход воздуха, необходимый для охлаждения машины, м³/с,

$$Q_{воз} = \frac{\Sigma P'}{1100\cdot 2\Delta\vartheta_{воз}}, \quad (8\text{-}154)$$

где $\Sigma P'$ определяется согласно (8-125);

$\Delta\vartheta_{воз}$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины; при вентиляционном расчете принимается, что превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим в 2 раза больше среднего превышения температуры $\Delta\vartheta_{воз}$, т. е. $\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх} = 2\Delta\vartheta_{воз}$.

Давление вентилятора, Па, необходимое для обеспечения заданного расхода воздуха $Q_{воз}$,

$$H = ZQ_{воз}^2, \quad (8\text{-}155)$$

где Z — эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины; средние значения Z для машин постоянного тока серийного исполнения приведены на рис. 5-5.

Аэродинамическая характеристика вентиляционной системы машины с вентиляторами центробежного типа описывается квадратичной параболой:

$$H = H_0\left[1 - \left(\frac{Q_{воз}}{Q_{0воз}}\right)^2\right], \quad (8\text{-}156)$$

где H_0 — давление, создаваемое вентилятором в режиме холостого хода ($Q_{воз}=0$);

$Q_{0воз}$ — расход вентилятора в режиме короткого замыкания (при работе вентилятора в открытой атмосфере $H=0$).

При аксиальной системе вентиляции наружный диаметр центробежного вентилятора, м,

$$D_{2в} \approx 0{,}9\, d_с, \quad (8\text{-}157)$$

где $d_с$ — внутренний диаметр станины, м.

Внутренний диаметр колеса вентилятора, м,

$$D_{1в} = (1,25 \div 1,3) D, \quad (8\text{-}158)$$

где D — диаметр якоря.

Ширина лопаток вентилятора

$$b_{л,в} = (0,12 \div 0,15) D_{2в}. \quad (8\text{-}159)$$

Число лопаток вентилятора выбирается согласно формуле (5-131). Давление в режиме холостого хода, Па

$$H_0 = \eta_{a0} \rho (u_2^2 - u_1^2), \quad (8\text{-}160)$$

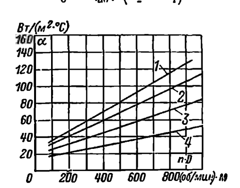


Рис. 8-34. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей при радиальной вентиляции.

1 — якоря и лобовых частей обмоток якоря; 2 — полюсного наконечника главного полюса в воздушный зазор; 3 — обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; 4 — дуг компенсационной обмотки.

где $\eta_{a0} \approx 0,6$ — КПД вентилятора в режиме холостого хода;

$$u_2 = \frac{\pi D_{2b} n}{60}; \; u_1 = \frac{\pi D_{1b} n}{60}.$$

Расход воздуха в режиме короткого замыкания $Q_{вmax}$, м³/с,

$$Q_{вmax} = 0,42 u_2 S_2, \quad (8\text{-}161)$$

где $S_2 = 0,92 \pi D_{2b} b_{л,в}$.

Действительный расход воздуха $Q_{воз}$ при известных значениях H_0, H, $Q_{вmax}$ определяется согласно (8-155) и (8-156), м³:

$$Q_{воз} = Q_{вmax} \sqrt{\frac{H_0}{H_0 + Z Q_{вmax}^2}}. \quad (8\text{-}162)$$

Действительный расход воздуха, рассчитанный по (8-162), должен быть равен необходимому расходу (8-154). Если это равенство не обеспечивается, то изменением ширины вентилятора $b_{л,в}$ и диаметров $D_{2в}$ и $D_{1в}$ необходимо обеспечить требуемый расход воздуха.

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_{вен} = \frac{H Q_{воз}}{\eta_э}, \quad (8\text{-}163)$$

где $\eta_э = 0,18 \div 0,2$ — энергетический КПД вентилятора.

При радиальной системе вентиляции, выполняемой в основном в мощных машинах, вентиляционный расчет проводят по схеме полного аэродинамического расчета всех участков системы согласно методике, изложенной в гл. 5. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей активных частей машины при радиальной системе вентиляции приведены на рис. 8-34.

8-12. ПРИМЕР РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Задание на проект и исходные данные

Рассчитать и разработать конструкцию двигателя постоянного тока со следующими данными.

Мощность $P_н = 7,5$ кВт. Номинальное напряжение сети $U_н = 220$ В. Номинальная частота вращения $n_н = 1500$ об/мин. Высота оси вращения $h = 160 \cdot 10^{-3}$ м. Возбуждение параллельное: а) без стабилизирующей обмотки; б) со стабилизирующей обмоткой. Исполнение по степени защиты IP22, по способу охлаждения — самовентиляция (IC01). Режим работы — длительный. Изоляция класса нагревостойкости B.

Конструкция двигателя должна соответствовать требованиям ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала (ГОСТ 13267-73), а также общим техническим требованиям на машины электрические (ГОСТ 183-74). За основу конструкции принимается машина постоянного тока серии П или 2П.

Дополнительное требование: рассчитать и сравнить рабочие характеристики двигателя без стабилизирующей обмотки и со стабилизирующей обмоткой.

Выбор главных размеров

1. Предварительное значение КПД электродвигателя выбираем по рис. 8-6: $\eta = 84\%$.

2. Ток электродвигателя (предварительное значение)

$$I_н = \frac{P_н \cdot 10^3}{\eta U_н} = \frac{7,5 \cdot 10^3}{0,84 \cdot 220} = 40,5 \text{ А}.$$

3. Ток якоря, принимая ток в шунтовой обмотке согласно табл. 8-10 равным около $0,025 I_н$,

$$I = 0,975 \cdot 40,5 = 39,6 \text{ А}.$$

4. Электромагнитная мощность по (8-1а)

$$P' = P_н \frac{100+\eta}{2\eta} = 7500 \frac{100+84}{2\cdot 84} =$$
$$= 8250 \text{ Вт}.$$

5. Диаметр якоря по (8-2): $D=h=0{,}156$ м.
6. Выбираем линейную нагрузку якоря по рис. 8-8: $A=2\cdot 10^4$ А/м.
7. Индукция в воздушном зазоре по рис. 8-9: $B_\delta=0{,}65$ Тл.

Расчетный коэффициент полюсной дуги по рис. 8-7 $\alpha_\delta=0{,}64$.

8. Расчетная длина якоря

$$l_\delta = \frac{6{,}1P'}{\alpha_\delta A B_\delta D^2 n_н} =$$
$$= \frac{6{,}1\cdot 8250}{0{,}64\cdot 20\,000\cdot 0{,}65\cdot (0{,}156)^2\cdot 1500} =$$
$$= 0{,}165 \text{ м}.$$

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов l_δ равен полной длине сердечника якоря: $l_\delta = l_{п} = 0{,}165$ м.

9. Отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D} = \frac{0{,}165}{0{,}156} = 1{,}06.$$

10. Число полюсов по рис. 8-10: $2p=4$
11. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}}{4} = 0{,}122 \text{ м}.$$

12. Расчетная ширина полюсного наконечника

$$b_\delta = \alpha_\delta \tau = 0{,}64\cdot 122\cdot 10^{-3} = 78\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

13. Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной ширине

$$b_р = b_\delta = 78\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Выбор обмотки якоря

14. Ток параллельной ветви

$$I_a = \frac{I}{2a} = \frac{39{,}6}{2} = 19{,}8 \text{ А}.$$

15. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a=2$.
16. Предварительное общее число эффективных проводников по (8-6)

$$N = \frac{\pi D A}{I_a} = \frac{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}\cdot 20\,000}{19{,}8} = 496.$$

17. Крайние пределы чисел пазов якоря с использованием (8-7)

$$Z_{min} = \frac{\pi D}{t_{1max}} = \frac{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}}{3\cdot 10^{-2}} = 16;$$

$$Z_{max} = \frac{\pi D}{t_{1min}} = \frac{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}}{1{,}5\cdot 10^{-2}} = 33.$$

Принимаем:

$$Z = 29;\quad t = \frac{\pi D}{Z} = 16{,}9\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

18. Число эффективных проводников в пазу

$$N_п = \frac{N}{Z} = \frac{496}{29} = 17{,}2,$$

принимаем $N_п = 18$, тогда

$$N = N_п Z = 18\cdot 29 = 522.$$

19. Выбираем паз полузакрытой овальной формы с параллельными сторонами зубца.

20. Число коллекторных пластин K для различных значений $u_п = K/Z$ выбираем, сравнивая три варианта:

№ п/п	$u_п$	$K=u_п Z$	$w_с=N/2K$	$U_{к,ср}$, В
1	1	29	9	30,4
2	2	58	4,5	15,2
3	3	87	3	10,1

Поскольку $U_{к,ср}=2pU/K$ должно быть в пределах 15—16 В, принимаем вариант 3, обеспечивающий обмотку с целым числом витков в секции $w_с=3$. Тогда число коллекторных пластин $K=87$, число эффективных проводников в пазу $N_п=18$, число витков в обмотке якоря $w_a = \frac{N}{2w_с} = \frac{522}{2\cdot 3} = 87$.

1. Уточняем линейную нагрузку:

$$A = \frac{N I_a}{\pi D} = \frac{522\cdot 19{,}8}{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}} = 21\,000 \text{ А/м}.$$

22. Корректируем длину якоря:

$$l_\delta = 165\cdot 10^{-3}\frac{20\,000}{21\,000} = 0{,}157 \text{ м}.$$

23. Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах

$$D_к \approx (0{,}65 \div 0{,}8) D = (0{,}65 \div 0{,}8)\times$$
$$\times 156\cdot 10^{-3} = (94 \div 125)\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

По таблице предпочтительного ряда чисел (см. § 8-4) для диаметра коллектора принимаем:

$$D_к = 0{,}100 \text{ м}.$$

24. Окружная скорость коллектора

$$v_к = \frac{\pi D_к n_н}{60} = \frac{\pi\cdot 0{,}1\cdot 1500}{60} = 7{,}85 \text{ м/с}.$$

25. Коллекторное деление

$$t_к = \frac{\pi D_к}{K} = \frac{\pi\cdot 100\cdot 10^{-3}}{87} = 3{,}61\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

26. Полный ток паза

$$I_п = I_a N_п = 19{,}8\cdot 18 = 354 \text{ А}.$$

27. Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

$$J_a = \frac{AJ_a}{A} = \frac{16 \cdot 10^{11}}{21\,000} = 7{,}6 \cdot 10^{6}\ \text{А/м}^2,$$

где AJ_a принимаем предварительно по рис. 8-8.

28. Предварительное сечение эффективного провода по (8-11)

$$q_a = \frac{I_a}{J_a} = \frac{19{,}8}{7{,}6 \cdot 10^6} = 2{,}6 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^2.$$

Принимаем два параллельных проводника марки ПЭТВ: по ГОСТ диаметр голого провода $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ м; диаметр изолированного провода $1{,}405 \cdot 10^{-3}$ м; сечение эффективного проводника $2 \cdot 1{,}368 \cdot 10^{-6} = 2{,}736 \cdot 10^{-6}$ м^2.

Расчет геометрии зубцовой зоны

29. Сечение полузакрытого паза (за вычетом сечения пазовой изоляции и пазового клина) при предварительно принятом коэффициенте заполнения $k_з = 0{,}72$ по (8-22)

$$S_0 = \frac{N_п \cdot 2d_{из}}{k_з} = \frac{18 \cdot 2(1{,}417 \cdot 10^{-3})^2}{0{,}72} = 98 \cdot 10^{-6}\ \text{м}^2.$$

30. Высота паза (предварительно по рис. 8-12) $h_п = 26 \cdot 10^{-3}$ м.

Высота шлица паза $h_ш = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ *м*; ширина шлица $b_ш = 3 \cdot 10^{-3}$ м.

31. Ширина зубца по (8-13)

$$b_z = \frac{B_\delta t_1}{B_z k_c} = \frac{0{,}64 \cdot 16{,}9 \cdot 10^{-3}}{1{,}72 \cdot 0{,}94} = 6{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{м},$$

где $B_z = 1{,}72$ Тл — допустимое значение индукции в стали зубца по табл. 8-11.

32. Больший радиус по (8-15)

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_ш) - Zb_z}{2(Z + \pi)} = \frac{\pi(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-3}}{2(29 + \pi)} = 4{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

33. Меньший радиус по (8-16)

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_п) - Zb_z}{2(Z - \pi)} = \frac{\pi(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 26 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6{,}8 \cdot 10^{-3}}{2(29 - \pi)} = 2{,}52 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

принимаем $r_2 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

34. Расстояние между центрами радиусов по (8-17)

$$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2 = 26 \cdot 10^{-3} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} - 4{,}5 \cdot 10^{-3} - 2{,}5 \cdot 10^{-3} = 18{,}22 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

35. Минимальное сечение зубцов якоря по табл. 8-18

$$S_z = \frac{Z}{2p}\alpha_\delta b_z l_\delta k_c = \frac{29}{4} 0{,}64 \cdot 6{,}8 \times 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}94 = 46{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{м}^2,$$

где $k_c = 0{,}94$ — коэффициент заполнения магнитопровода якоря сталью по табл. 6-11.

36. Предварительное значение ЭДС

$$E_н = U_н k_д = 220 \cdot 0{,}945 = 208\ \text{В},$$

где $k_д$ — по табл. 8-10.

37. Предварительное значение магнитного потока на полюс

$$\Phi_{\delta н} = \frac{60E_н}{pNn_н} = \frac{60 \cdot 208}{2 \cdot 522 \cdot 1500} = 0{,}797 \cdot 10^{-2}\ \text{Вб}.$$

Принимаем предварительное значение $\Phi_{\delta н} = 0{,}8 \cdot 10^{-2}$ Вб.

38. Для магнитопровода якоря принимаем сталь марки 2312. Индукция в сечении зубцов

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_z} = \frac{0{,}8 \cdot 10^{-2}}{46{,}5 \cdot 10^{-4}} = 1{,}72\ \text{Тл}.$$

39. Расчетом сечения пазовой изоляции согласно спецификации табл. 3-15 для заданного класса нагревостойкости изоляции B и выбранной форме паза уточняем коэффициент заполнения паза: $k_з = 0{,}72$.

Расчет обмотки якоря

40. Длина лобовой части витка

$$l_л \approx (1{,}2 \div 1{,}35)\tau = (1{,}2 \div 1{,}35) \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 165 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$$

41. *Средняя длина витка обмотки якоря* по (8-23)

$$l_{аср} = 2(l_п + l_л) = 2(0{,}157 + 0{,}165) = 0{,}644\ \text{м}$$

42. Полная длина проводников обмотки якоря с использованием п. 20

$$L_{ма} = w_a l_{аср} = 87 \cdot 644 \cdot 10^{-3} = 56{,}1\ \text{м}.$$

43. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 20°$ C по (8-26)

$$R_a = \frac{L_{ма}}{57 \cdot 10^6 q_a (2a)^2} = \frac{56{,}1}{57 \cdot 10^6 \cdot 2{,}736 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 0{,}09\ \text{Ом}.$$

44. Сопротивление обмотки якоря при $\vartheta = 75°$ C (см. табл. 4-1)

$$R_{ап} = 1{,}22R_a = 1{,}22 \cdot 0{,}09 = 0{,}11\ \text{Ом}.$$

45. Масса меди обмотки якоря по (8-27)

$$m_{ма} = 8900 L_{ма} q_a = 8900 \cdot 56{,}1 \cdot 2{,}736 \cdot 10^{-6} = 1{,}37\ \text{кг}.$$

46. Расчет шагов обмотки:

а) шаг по коллектору и результирующий шаг

$$y_к = y = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{87 - 1}{2} = 43;$$

б) первый частичный шаг

$$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon = \frac{87}{4} \pm \frac{3}{4} = 21;$$

в) второй частичный шаг:

$$y_2 = y - y_1 = 43 - 21 = 22.$$

Определение размеров магнитной цепи

47. Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметра вала

$$D_0 = 27\sqrt[3]{\frac{P_н}{n_н}} = 27\sqrt[3]{\frac{7,5}{1500}} = 46\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

48. Высота спинки якоря (см. рис. 8-11)

$$h_j = \frac{D - D_0}{2} - h_п = \frac{156\cdot 10^{-3} - 46\cdot 10^{-3}}{2} - 26\cdot 10^{-3} = 29\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

49. Принимаем для сердечников главных полюсов сталь марки 3411 толщиной 0,5 мм, коэффициент рассеяния $\sigma_г = 1,15$, длину сердечника $l_г = l_\delta = 157\cdot 10^{-3}$ м, коэффициент заполнения сталью по табл. 6-11 $k_c = 0,95$, ширину выступа полюсного наконечника $b_в \approx 0,2\,b_p = 8\cdot 10^{-3}$ м.

50. Ширина сердечника главного полюса (см. рис. 8-18)

$$b_г = b_p - 2b_{г,в} = 78\cdot 10^{-3} - 2\cdot 8\cdot 10^{-3} = 62\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

51. Индукция в сердечнике из (8-61)

$$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{k_c b_г l_г} = \frac{1,15\cdot 0,8\cdot 10^{-2}}{0,95\cdot 62\cdot 10^{-3}\cdot 157\cdot 10^{-3}} = 1,0\text{ Тл}.$$

52. Сечение станины

$$S_c = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{2B_c} = \frac{1,15\cdot 0,8\cdot 10^{-2}}{2\cdot 1,3} = 35,7\cdot 10^{-4}\text{ м}^2$$

(см. § 8-6).

53. Длина станины по (8-59)

$$l_c = l_г + 0,4D = 157\cdot 10^{-3} + 0,4\cdot 156\cdot 10^{-3} = 220\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

54. Высота станины (см. табл. 8-18)

$$h_c = \frac{S_c}{l_c} = \frac{35,7\cdot 10^{-4}}{220\cdot 10^{-3}} = 16,2\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

55. Наружный диаметр станины

$$D_н = 2h - (8 \div 10)\cdot 10^{-3} = 320\cdot 10^{-3} - (8 \div 10)\cdot 10^{-3} = 310\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

56. Внутренний диаметр станины

$$d_c = D_н - 2h_c = 310\cdot 10^{-3} - 2\cdot 16,2\cdot 10^{-3} = 0,2776\text{ м}.$$

57. Высота главного полюса (см. рис. 8-24)

$$h_г = \frac{d_c - D}{2} - 3\delta = \frac{277,6\cdot 10^{-3} - 156\cdot 10^{-3}}{2} - 3\cdot 1,5 = 57\cdot 10^{-3}\text{ м},$$

где δ — см. п. 64.

Расчетные сечения магнитной цепи

58. Сечение воздушного зазора (см. табл. 8-18)

$$S_\delta = b_p' l_\delta = 78\cdot 10^{-3}\cdot 157\cdot 10^{-3} = 12,25\cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

59. Длина стали якоря

$$l_{ст} = l_\delta k_c = 157\cdot 10^{-3}\cdot 0,94 = 0,146\text{ м}.$$

60. Минимальное сечение зубцов якоря (см. п. 35)

$$S_z = 46,5\cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

61. Сечение спинки якоря (см. табл. 8-18)

$$S_j = l_c h_j = 146\cdot 10^{-3}\cdot 29\cdot 10^{-3} = 42,4\cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

62. Сечение сердечника главного полюса (см. табл. 8-18)

$$S_г = k_c l_г b_г = 0,95\cdot 157\cdot 10^{-3}\cdot 62\cdot 10^{-3} = 92,5\cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

63. Сечение станины (см. п. 52)

$$S_c = 35,7\cdot 10^{-4}\text{ м}^2.$$

Средние длины магнитных линий

64. Воздушный зазор согласно рис. 8-17 принимаем $\delta = 1,5\cdot 10^{-3}$ м.

65. Коэффициент воздушного зазора, учитывающий наличие пазов на якоре, по (8-54б)

$$k_{\delta a} = \frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - b_ш + 10\delta} = \frac{16,9\cdot 10^{-3} + 1,5\cdot 10\cdot 10^{-3}}{16,9\cdot 10^{-3} - 3\cdot 10^{-3} - 10\cdot 1,5\cdot 10^{-3}} = 1,1.$$

66. Расчётная длина воздушного зазора

$$L_\delta = k_{\delta a}\,\delta = 1,1\cdot 1,5\cdot 10^{-3} = 1,65\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

67. Зубцы якоря (табл. 8-18)

$$L_z = h_п - 0,2r_1 = 26\cdot 10^{-3} - 0,2\cdot 4,5\cdot 10^{-3} = 25,1\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

68. Спинка якоря (табл. 8-1)

$$L_j = \frac{\pi(D_0 + h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2} = \frac{\pi(46\cdot 10^{-3} + 29\cdot 10^{-3})}{2\cdot 4} + \frac{29\cdot 10^{-3}}{2} = 44\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

69. Сердечник главного полюса

$$L_г = h_г = 57\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

70. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной

$$L_{c,п} = 2l_г\cdot 10^{-4} + 1\cdot 10^{-4} = 0,13\cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

Расчет характеристики намагничивания машины

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta н}$	$0,75\Phi_{\delta н}$	$0,9\Phi_{\delta н}$	$1,0\Phi_{\delta н}$	$1,1\Phi_{\delta н}$	$1,15\Phi_{\delta н}$
1	ЭДС	E	В	104,1	156,5	187,5	208,3	229	240
2	Магнитный поток	$\Phi_\delta = \frac{60aE}{npN}$	Вб	$0,4 \times 10^{-2}$	$0,6 \times 10^{-2}$	$0,72 \times 10^{-2}$	$0,8 \times 10^{-2}$	$0,88 \times 10^{-2}$	$0,92 \times 10^{-2}$
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_\delta \tau l_\delta}$	Тл	0,326	0,488	0,586	0,652	0,716	0,75
4	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_\delta = 0,8 L_\delta \times B_\delta \cdot 10^{-6}$	А	430	645	774	860	945	990
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_z = k_z B_\delta$	Тл	0,86	1,29	1,55	1,72	1,89	1,98
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря для стали 2312	H_z	А/м	$1,7 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^2$	$23,5 \times 10^2$	$89 \cdot 10^2$	$188 \cdot 10^2$	$300 \cdot 10^2$
7	Магнитное напряжение зубцов	$F_z = L_z H_z$	А	4,7	13	59	224	472	753
8	Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \Phi_\delta / 2S_j$	Тл	0,472	0,71	0,85	0,945	1,04	1,09
9	Напряженность магнитного поля в спинке якоря	H_j	А/м	$0,74 \times 10^2$	$0,99 \times 10^2$	$1,65 \times 10^2$	$2,12 \times 10^2$	$2,64 \times 10^2$	$2,94 \times 10^2$
10	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = L_j H_j$	А	3,26	4,35	7,25	9,3	11,6	12,9
11	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_г = \sigma_г \Phi_\delta$	Вб	$0,46 \times 10^{-2}$	$0,69 \times 10^{-2}$	$0,83 \times 10^{-2}$	$0,92 \times 10^{-2}$	$1,01 \times 10^{-2}$	$1,06 \times 10^{-2}$
12	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_г = \Phi_г / S_г$	Тл	0,498	0,745	0,895	0,995	1,09	1,14
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса для стали 3411	$H_г$	А/м	85	125	150	170	220	240
14	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_г = L_г H_г$	А	4,85	7,1	8,55	9,7	12,5	13,7
15	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{с.п} = B_г$	Тл	0,498	0,745	0,895	0,995	1,09	1,14

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0{,}5\Phi_{\delta н}$	$0{,}75\Phi_{\delta н}$	$0{,}9\Phi_{\delta н}$	$1{,}0\Phi_{\delta н}$	$1{,}1\Phi_{\delta н}$	$1{,}15\Phi_{\delta н}$
16	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{с.п} = 0{,}8B_{с.п}L_{с.п}$	А	52	78	93,5	104	114	119
17	Магнитная индукция в станине	$B_с = \dfrac{\sigma_г \Phi_\delta}{2S_с}$	Тл	0,645	0,980	1,16	1,29	1,42	1,48
18	Напряженность магнитного поля в станине (для массивных станин)	$H_с$	А/м	530	898	1210	1550	2230	2710
19	Магнитное напряжение станины	$F_с = L_с H_с$	А	65,2	111	149	191	275	335
20	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\delta + F_z + F_j + F_{с.п} + F_с = F_\Sigma$	А	560	859	1092	1398	1826	2224
21	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_z + F_j$	А	438	662	840	1093	1429	1756

71. Станина (табл. 8-18)

$$L_с = \frac{\pi(D_п - b_с)}{4p} + \frac{b_с}{2} = \frac{\pi(310\cdot10^{-3} - 16{,}2\cdot10^{-3})}{8} + \frac{16{,}2\cdot10^{-3}}{2} = 0{,}1236 \text{ м}.$$

Индукция в расчетных сечениях магнитной цепи

72. Индукция в воздушном зазоре (табл. 8-18)

$$B_{\delta н} = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_\delta} = \frac{0{,}8\cdot10^{-2}}{12{,}25\cdot10^{-4}} = 0{,}652 \text{ Тл},$$

где $\Phi_{\delta н}$ — по п. 37.

73. Индукция в сечении зубцов якоря (табл. 8-18)

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta н}}{S_z} = \frac{0{,}8\cdot10^{-2}}{46{,}5\cdot10^{-4}} = 1{,}72 \text{ Тл},$$

где $\Phi_{\delta н}$ — по п. 37.

74. Индукция в спинке якоря (табл. 8-18)

$$B_j = \frac{\Phi_{\delta н}}{2S_j} = \frac{0{,}8\cdot10^{-2}}{2\cdot42{,}4\cdot10^{-4}} = 0{,}945 \text{ Тл}.$$

75. Индукция в сердечнике главного полюса (табл. 8-18)

$$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{S_г} = \frac{1{,}15\cdot0{,}8\cdot10^{-2}}{92{,}5\cdot10^{-4}} \; 0{,}995 \text{ Тл};$$

для стали 3411 допустимое значение $B_г \leqslant \leqslant 1{,}5$ Тл.

76. Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной $B_{сп} = B_г = 0{,}995$ Тл.

77. Индукция в станине (табл. 8-18)

$$B_с = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta н}}{2S_с} = \frac{1{,}15\cdot0{,}8\cdot10^{-2}}{2\cdot35{,}7\cdot10^{-4}} = 1{,}29 \text{ Тл}.$$

Магнитные напряжения отдельных участков магнитной цепи (по табл. 8-18)

78. Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta = 0{,}8B_\delta L_\delta\cdot10^6 = 0{,}8\cdot0{,}652\cdot1{,}65\cdot10^{-3}\cdot10^6 = 860 \text{ А}.$$

79. Коэффициент вытеснения потока

$$k_z = \frac{tl_\delta}{b_z l_с} = \frac{16{,}9\cdot10^{-3}\cdot157\cdot10^{-3}}{6{,}8\cdot10^{-3}\cdot147\cdot10^{-3}} = 2{,}64.$$

80. Магнитное напряжение зубцов якоря

$$F_z = H_z L_z = 8{,}9 \cdot 10^3 \cdot 25{,}1 \cdot 10^{-3} = 224 \text{ A}.$$

H_z определяется по табл. П-18 для стали 2312.

81. Магнитное напряжение ярма якоря

$$F_j = H_j L_j = 2{,}12 \cdot 10^2 \cdot 44 \cdot 10^{-3} = 9{,}3 \text{ A}.$$

82. Магнитное напряжение сердечника главного полюса (сталь 3411)

$$F_г = H_г L_г = 170 \cdot 57 \cdot 10^{-3} = 9{,}7 \text{ A}.$$

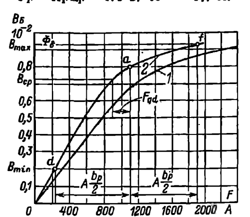


Рис. 8-35. Характеристика холостого хода (*1*) и переходная характеристика (*2*).

83. Магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной

$$F_{с,п} = 0{,}8 B_г L_{с,п} \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}995 \cdot 0{,}13 \times \times 10^{-3} \cdot 10^6 = 104 \text{ A}.$$

84. Магнитное напряжение станины (массивная сталь Ст3)

$$F_с = H_с L_с = 15{,}5 \cdot 10^2 \cdot 123{,}6 \cdot 10^{-3} = 191 \text{ A}.$$

85. Суммарная МДС на полюс

$$F_\Sigma = F_\delta + F_z + F_j + F_г + F_{с,п} + F_с = 860 + 224 + 9{,}3 + 9{,}7 + 104 + 191 = 1398 \text{ A}.$$

86. МДС переходного слоя

$$F_{\delta zj} = F_\delta + F_j + F_z = 860 + 9 + 224 = 1093 \text{ A}.$$

Аналогичным образом производим расчет для потоков, равных 0,5; 0,75; 1,1; 1,15 номинального значения. Результаты расчета сведены в табл. 8-22. Строим характеристику намагничивания (*1*) и переходную характеристику (*2*) (рис. 8-35).

Расчет параллельной обмотки возбуждения

87. Размагничивающее действие реакции якоря определяем по переходной характеристике (рис. 8-36) $F_{qd} = 220$ А.

88. Необходимая МДС параллельной обмотки по (8-64)

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} = 1398 + 220 = 1618 \text{ A}.$$

89. Принимаем ширину катушки параллельной обмотки $b_{кт,п} = 20 \cdot 10^{-3}$ м, тогда средняя длина витка обмотки по (8-65)

$$l_{ср,в} = 2(l_г + b_г) + \pi(b_{кт,в} + 2\Delta_{из}) = 2(157 \cdot 10^{-3} + 62 \cdot 10^{-3}) + \pi(20 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^3) = 504 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

90. Сечение меди параллельной обмотки по (8-66)

$$q_в = \frac{k_{з,п}\, m \cdot 2pF_в\, l_{в,ср}}{57 \cdot 10^6 U_в} = \frac{1{,}1 \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot 1618 \cdot 504 \cdot 10^{-3}}{57 \cdot 10^6 \cdot 220} = 0{,}349 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

где a — число параллельных ветвей обмотки параллельного возбуждения: принимаем $a=1$; $k_з$ — коэффициент запаса: $k_з=1{,}1$.

Принимаем по табл. 8-20 круглый провод ПЭТВ: по табл. П-28 диаметр голого провода $0{,}71 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр изолированного провода $0{,}77 \cdot 10^{-3}$ м, сечение провода $0{,}396 \cdot 10^{-6}$ м².

91. Номинальную плотность тока принимаем (для машин исполнения IP22) (по § 8-7)

$$J_в = 4{,}45 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

92. Число витков на полюс по (8-67)

$$w_в = \frac{F_в}{J_в q_в} = \frac{1618}{4{,}45 \cdot 10^6 \cdot 0{,}396 \cdot 10^{-6}} = 916.$$

93. Определяем номинальный ток возбуждения по (8-67):

$$I_{в,н} = \frac{F_в}{w_в} = \frac{1618}{916} = 1{,}76 \text{ A}.$$

94. Плотность тока в обмотке

$$J_{в,н} = 4{,}45 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

95. Полная длина обмотки

$$L_в = 2p l_{в,ср} w_в = 4 \cdot 504 \cdot 10^{-3} \cdot 916 = 18{,}45 \text{ м}.$$

96. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $\vartheta = 20°$ C по п. 95 и (8-69)

$$R_в = \frac{L_в}{57 \cdot 10^6 q_в} = \frac{18{,}45}{57 \cdot 10^6 \cdot 0{,}396 \cdot 10^{-6}} = 81{,}7 \text{ Ом}.$$

97. Сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75°$ C

$$R_{в75} = 1{,}22 R_в = 1{,}22 \cdot 81{,}7 = 100 \text{ Ом}.$$

98. Масса меди параллельной обмотки по п. 94 и (8-69а)

$$m_{м,в} = 8{,}9 L_{в,ср} w_в q_в \cdot 10^3 = 8{,}9 \cdot 18{,}45 \cdot 0{,}396 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3 = 6{,}5 \text{ кг}.$$

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 8-7—8-9.

99. Ширина нейтральной зоны по (8-82)

$$b_{н,з} = \tau - b_р = 122\cdot10^{-3} - 78\cdot10^{-3} = 44\cdot10^{-3} \text{ м}.$$

100. Принимаем ширину щетки равной $b_щ = (2\div4)t_к$; по табл. П-34 выбираем стандартные размеры щетки: $b_щ \times l_щ = 8\cdot10^{-3}$ м $\times 16\cdot10^{-3}$ м. Выбираем щетки марки ЭГ-14.

101. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором

$$S_щ = b_щ l_щ = 8\cdot10^{-3}\cdot16\cdot10^{-3} = 1,28\cdot10^{-4} \text{ м}^2.$$

102. При допустимой плотности тока $J_щ = 11\cdot10^4$ А/м² число щеток на болт

$$N_щ = \frac{I_п}{pS_щ J_щ} = \frac{39,6}{2\cdot1,28\cdot10^{-4}\cdot11\cdot10^4} \approx 1,4;$$

принимаем $N_щ = 2$.

103. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором

$$\Sigma S_щ = 2pN_щ S_щ = 4\cdot2\cdot1,28\cdot10^{-4} = 10\cdot10^{-4} \text{ м}^2.$$

104. Плотность тока под щетками по (8-83)

$$J_щ = \frac{2I_н}{\Sigma S_щ} = \frac{2\cdot39,6}{10\cdot10^{-4}} = 7,92\cdot10^4 \text{ А/м}^2.$$

105. Активная длина коллектора по (8-86)

$$l_к = N_щ(l_щ + 8\cdot10^{-3}) + 10\cdot10^{-3} = 2(16\cdot10^{-3} + 8\cdot10^{-3}) + 10\cdot10^{-3} = 58\cdot10^{-3}.$$

Коммутационные параметры

106. Ширина зоны коммутации по (8-81)

$$b_{з,к} = \left(\frac{b_щ}{t_к} + u_п - \frac{a}{p} + \varepsilon_к\right) t_к \frac{D}{D_к} = \left(\frac{8\cdot10^{-3}}{3,61\cdot10^{-3}} + 3 - \frac{1}{2} + \frac{3}{4}\right)\cdot3,61 \times 10^{-3}\frac{156\cdot10^{-3}}{100\cdot10^{-3}} = 30,8\cdot10^{-3} \text{ м}.$$

107. Отношение $b_{з,к}/(\tau - b_р) = 30,8/44 = 0,7$, что удовлетворяет условию

$$\frac{b_{з,к}}{\tau - b_р} = 0,55 \div 0,70.$$

108. Коэффициент магнитной проводимости паза по (8-76)

$$\lambda = 0,6\frac{h_п}{2r_2} + \frac{h_щ}{b_щ} + \frac{l_л}{l_a} + \frac{2,5\cdot10^6}{Al\omega_c v_a}\frac{a}{p} = 0,6\frac{26\cdot10^{-3}}{2\cdot2,5\cdot10^{-3}} + \frac{0,8\cdot10^{-3}}{3\cdot10^{-3}} + \frac{146\cdot10^{-3}}{157\cdot10^{-3}} + \frac{2,5\cdot10^6}{2,1\cdot10^4\cdot157\cdot10^{-3}\cdot3\cdot12,2}\frac{1}{2} = 5,36.$$

109. Реактивная ЭДС по (8-75)

$$E_р = 2\lambda w_c l_\delta A v_a\cdot10^{-6} = 2\cdot5,36\cdot3\cdot157 \times 10^{-3}\cdot2,1\cdot10^4\cdot12,2\cdot10^{-6} = 1,3 \text{ В}.$$

110. Воздушный зазор под добавочным полюсом принимаем: $\delta_д \approx (1,5\div2)\delta$, т. е.

$$\delta_д = 3\cdot10^{-3} \text{ м}.$$

111. Расчетная длина воздушного зазора под добавочным полюсом по (8-54б) и § 8-9

$$L_{\delta д} = k_{\delta д}\,\delta_д = 1,12\cdot3\cdot10^{-3} = 3,36\cdot10^{-3} \text{ м};$$

$$k_{\delta д} = \frac{t_1 + 10\delta_д}{t_1 - b_ш + 10\delta_д} = \frac{16,9\cdot10^{-3} + 10\cdot3\cdot10^{-3}}{16,9 - 3\cdot10^{-3} + 10\cdot3\cdot10^{-3}} = 1,12.$$

112. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом

$$B_{\delta д} = \frac{E'_р}{2l_\delta v_a} = \frac{1,45}{2\cdot157\cdot10^{-3}\cdot12,2} \approx 0,376 \text{ Тл},$$

где $E'_р \approx 1,1 E_р$ принимаем для обеспечения несколько ускоренной коммутации.

113. Расчетная ширина наконечника добавочного полюса согласно (8-88) и на основании предварительных расчетов

$$b'_д < (0,55\div0,75)\,b_{з,к} < (0,55\div0,75) \times 30,8\cdot10^{-3} = 14\cdot10^{-3};$$

$$b'_д = b_{д,н} + 2\delta_д = 8\cdot10^{-3} + 2\cdot3 \times 10^{-3} = 14\cdot10^{-3} \text{ м}.$$

114. Действительная ширина наконечника добавочного полюса

$$b_{д,н} = 8\cdot10^{-3} \text{ м}.$$

115. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре по (8-89)

$$\Phi_{\delta д} = B_{\delta д}\, l_{д,н}\, b'_д = 0,376\cdot157\cdot10^{-3} \times 14\cdot10^{-3} = 0,827\cdot10^{-3} \text{ Вб}.$$

116. Выбираем коэффициент рассеяния добавочного полюса $\sigma_д = 2,5$ (см. § 8-6), магнитный поток в сердечнике добавочного полюса по (8-90)

$$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д} = 2,5\cdot0,827\cdot10^{-3} = 0,207\cdot10^{-2} \text{ Вб}.$$

117. Сечение сердечника добавочного полюса

$$S_д = l_{д,н} b_{д,н} k_c = 155\cdot10^{-3}\cdot8\cdot10^{-3}\cdot0,95 = 1175\cdot10^{-6} \text{ м}^2.$$

118. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса по (8-91)

$$B_{сд} = \frac{\Phi_д}{S_д} = \frac{0,207\cdot10^{-2}}{1175\cdot10^{-6}} = 1,76 \text{ Тл}.$$

Таблица 8-23

Расчет МДС обмотки добавочных полюсов

№ п/п.	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta д}$	Вб	$0{,}827\cdot10^{-3}$
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta д} = \dfrac{\Phi_{\delta д}}{b'_{д.п}\, l_\delta}$	Тл	0,376
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0{,}8 L_{\delta д} B_{\delta д}\cdot10^{6}$	А	101
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_z = k_z B_{\delta д}$	Тл	0,99
5	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	H_z	А/м	2,35
6	Магнитное напряжение зубцов	$F_z = H_z L_z$	А	5,9
7	Магнитная индукция в ярме:			
	на участке согласного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \dfrac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	1,04
	на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$B_{j2} = \dfrac{\Phi_\delta - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл	0,86
8	Напряженность магнитного поля:			
	на участке с индукцией B_{j1}	H_{j1}	А/м	$2{,}64\cdot10^{2}$
	на участке с индукцией B_{j2}	H_{j2}	А/м	$1{,}7\cdot10^{2}$
	средняя напряженность магнитного поля в ярме	$H_{j\,ср} = \dfrac{H_{j1} - H_{j2}}{2}$	А/м	$0{,}47\cdot10^{2}$
9	Магнитное напряжение якоря	$F_j = H_{j\,ср} L_j$	А	2
10	Магнитный поток добавочного полюса	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	Вб	$2{,}07\cdot10^{-3}$
11	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{с.д} = \Phi_д / S_д$	Тл	1,76
12	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	А/м	$28\cdot10^{2}$
13	Магнитное напряжение сердечника добавочного полюса	$F_{д.п} = L_д H_{с.д}$	А	160
14	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом при $\delta_{с.д.п} = 0{,}2\cdot10^{-3}$ м	$F_{\delta с.д.п} = 0{,}8 B_{с.д}\, \delta_{с.д.п}\cdot10^{6}$	А	140
15	Магнитная индукция в станине:			
	на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{с1} = \dfrac{\Phi_г + \Phi_д}{2S_с}$	Тл	1,64
	на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{с2} = \dfrac{\Phi_г - \Phi_д}{2S_с}$	Тл	0,8
16	Напряженность магнитного поля в станине:			
	на участке с индукцией $B_{с1}$	$H_{с1}$	А/м	$47\cdot10^{2}$
	на участке с индукцией $B_{с2}$	$H_{с2}$	А/м	$6{,}82\cdot10^{2}$
17	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{с.ср} = \dfrac{H_{с1} - H_{с2}}{2}$	А/м	$20\cdot10^{2}$
18	Магнитное напряжение участка станины	$F_с = H_{с.ср} L_с$	А	236
19	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_z + F_j + F_{с.д} + F_{\delta с.д.п} + F_с$	А	645
20	МДС обмотки добавочного полюса	$F_д = F_{д\Sigma} + A\dfrac{\tau}{2}$	А	1935

Результаты расчета магнитной цепи добавочных полюсов сведены в табл. 8-23.

Расчет обмотки добавочных полюсов

119. МДС обмотки добавочного полюса (табл. 8-23)

$$F_д = 1935 \text{ А}.$$

120. Число витков обмотки добавочного полюса на один полюс по (8-93)

$$w_д = \frac{F_д}{I} = \frac{1935}{39,6} = 48,86;$$

принимаем $w_д = 49$.

121. Предварительное сечение проводников по (8-94)

$$q_д = \frac{I}{a_д J_д} = \frac{39,6}{1 \cdot 5 \cdot 10^6} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

При токе $I \leqslant 1000$ А целесообразно принимать $a_д = 1$. Для многослойных обмоток выбираем согласно рекомендациям (§ 8-7) плотность тока $J_д = 5 \cdot 10^6$ А/м².

122. Принимаем проводник обмотки добавочных полюсов из круглого провода марки ПСД (табл. 8-20) диаметром $3,15 \times 10^{-3}$ м (см. табл. П-28); диаметр изолированного провода $3,50 \cdot 10^{-3}$ м. Сечение провода $q_д = 7,8 \cdot 10^{-6}$ м²

123. Принимаем сердечник добавочного полюса короче якоря на $1 \cdot 10^{-3}$ м с каждой стороны для создания опоры для катушки. Длина сердечника $l_д = l_\delta - 2 \cdot 10^{-3} = 157 \times 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3} = 155 \cdot 10^{-3}$ м.

Ширина катушки $b_{кт,д} = 13 \cdot 10^{-3}$ м (по предварительному эскизу сечения катушки).

124. Средняя длина витка обмотки добавочного полюса по (8-95)

$$l_{д,ср} = 2(155 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3}) + \pi(13 + 2) \cdot 10^{-3} = 0,371 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

125. Полная длина проводников обмотки

$$L_д = 2p_д l_{д,ср} w_д = 4 \cdot 0,371 \cdot 49 = 72,7 \text{ м}.$$

126. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\vartheta = 20°$ С по (8-96) и п. 125

$$R_д = \frac{L_д}{57 \cdot 10^6 a_д^2 q_д} = \frac{72,7}{57 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6}} = 0,164 \text{ Ом}.$$

127. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при $\vartheta = 75°$ С

$$R_{д75} = 1,22 R_д = 1,22 \cdot 0,164 = 0,2 \text{ Ом}.$$

128. Масса меди обмотки добавочных полюсов

$$m_д = 8,9 \cdot 10^3 \cdot l_{д.ср} w_д 2p_д q_д = 8,9 \cdot 10^3 \times 0,371 \cdot 49 \cdot 4 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 5,05 \text{ кг}.$$

Потери и КПД по (8-10)

129. Электрические потери в обмотке якоря

$$P_{мa} = I^2 R_a = 39,6^2 \cdot 0,11 = 173 \text{ Вт}.$$

130. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$$P_{м,д} = I^2 R_д = 39,6^2 \cdot 0,195 = 314 \text{ Вт}.$$

131. Электрические потери в параллельной обмотке возбуждения

$$P_{м,в} = U_в I_{в,н} = 220 \cdot 1,76 = 385 \text{ Вт}.$$

132. Электрические потери в переходном контакте щеток на коллекторе

$$P_{э,щ} = 2\Delta U_щ I = 2 \cdot 39,6 = 80 \text{ Вт}.$$

132. Потери на трение щеток о коллектор

$$P_{т,щ} = \Sigma S_щ p_щ f v_к = 10 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 0,2 \times 7,85 = 47 \text{ Вт},$$

где $p_щ$ — давление на щетку; для щетки марки ЭГ-14 $p_щ = 3 \cdot 10^4$ Па.

$f = 0,2$ — коэффициент трения щетки.

134. Потери в подшипниках и на вентиляцию определяются по рис. 8-30:

$$(P_{т,п} + P_{вент}) = 55 \text{ Вт}.$$

135. Масса стали ярма якоря по (8-108)

$$m_j = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\pi\left[(D - 2h)^2 - D_0^2\right]}{4} l_{ст} k_c = 7,8 \cdot 10^3 \times \frac{\pi[(156 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 26 \cdot 10^{-3})^2 - (46 \cdot 10^{-3})^2]}{4} \times 157 \cdot 10^{-3} \cdot 0,94 = 7,5 \text{ кг}.$$

136. Условная масса стали зубцов якоря по (8-106)

$$m_z = 7800 Z b_z \left(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}\right) l_\delta k_c = 7800 \cdot 29 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} \times \left(18,22 + \frac{4,5 + 2,5}{2}\right) 10^{-3} \cdot 0,94 \approx 4,94 \text{ кг};$$

137. Магнитные потери в ярме якоря

$$P_j = m_j p_j = 7,5 \cdot 3,59 = 27 \text{ Вт},$$

где

$$p_j = 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_j^2 = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 1^2 \cdot 0,945^2 = 3,59 \text{ Вт/кг}.$$

138. Магнитные потери в зубцах якоря

$$P_z = m_z p_z = 4,94 \cdot 11,9 = 59 \text{ Вт},$$

где

$$p_z = 2,3 p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^\beta B_z^2 = 2,3 \cdot 1,75 \cdot 1^2 \cdot 1,72^2 = 11,9 \text{ Вт/кг}.$$

139. Добавочные потери

$$P_{доб} = 0,01 U I_н = 0,01 \cdot 220 \cdot 41,36 = 91 \text{ Вт},$$

где $I_н = 39,6 + 1,76 = 41,36$ А.

140. Сумма потерь

$$\Sigma P = P_{ма} + P_{м.ц} + P_{м.в} + P_{э.ш} + P_{т.ш} + (P_{т.п} + P_{вент}) + P_j + P_z + P_{доб} =$$
$$= 173 + 314 + 385 + 80 + 47 + 55 + 27 + 59 + 91 = 1231 \text{ Вт}.$$

141. Потребляемая мощность

$$P_1 = P_н + \Sigma P = 7500 + 1231 = 8731 \text{ Вт}.$$

$$\text{Ток } I_{1н} = \frac{P_1}{U_н} = \frac{8731}{220} = 39{,}7 \text{ А};$$

$$I_н = 39{,}7 - 1{,}76 = 38 \text{ А}.$$

142. Коэффициент полезного действия по (8-97)

$$\eta = \frac{P_н}{P_н + \Sigma P} = \frac{7500}{7500 + 1231} = 0{,}858.$$

Рабочие характеристики

Для построения рабочих характеристик двигателя n, M, I, P_1, $\eta = f(P_2)$ при $U = 220$ В и токе возбуждения $I_в = I_{в.н}$ принимаем, что потери холостого хода с нагрузкой практически не меняются и составляют:

$$P_0 = P_j + P_z + (P_{т.п} + B_{вент}) + P_{т.ш} =$$
$$= 27 + 59 + 55 + 47 = 188 \text{ Вт}.$$

143. МДС реакции якоря и расчет по переходной характеристике значений F_{qd} для нескольких значений тока якоря позволяют представить зависимость F_{qd} от тока I в виде

$$F_{qd} = 220\left(\frac{I - 10}{I_н - 10}\right).$$

144 При номинальном токе якоря $I_{ан} = 38$ А ЭДС обмотки якоря

$$E_н = U - I_a \Sigma R - 2\Delta U_щ =$$
$$= 220 - 38 \cdot 0{,}31 - 2 \cdot 1 = 206{,}2 \text{ В}.$$

145. Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_н = \frac{60 E_н}{pN \cdot 1500} = \frac{60 \cdot 206{,}2}{2 \cdot 522 \cdot 1500} =$$
$$= 0{,}79 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

146. По характеристике холостого хода (рис. 8-36)

$$B_\delta = 0{,}645 \text{ Тл}: \quad F_\Sigma = 1366 \text{ А}.$$

147. МДС обмотки возбуждения по (8-64)

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} = 1366 + 220 = 1586 \text{ А}.$$

148. Номинальный ток возбуждения

$$I_{в.н} = \frac{F_в}{w_в} = \frac{1586}{916} = 1{,}73 \text{ А}.$$

149. Номинальный ток двигателя

$$I_{1н} = I_н + I_{в.н} = 38 + 1{,}73 = 39{,}73 \text{ А}.$$

150. Потребляемая мощность двигателя

$$P_1 = U I_{1н} = 220 \cdot 39{,}73 = 8741 \text{ Вт}.$$

151. Полезная мощность на валу двигателя

$$P_2 = E I_н - P_0 - P_{доб}\left(\frac{I_н}{I_{1н}}\right)^2 =$$
$$= 206{,}2 \cdot 38 - 188 - 91\left(\frac{38}{39{,}6}\right)^2 = 7564 \text{ Вт}.$$

152. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7564}{8741} = 0{,}866.$$

153. Вращающий момент

$$M = 9{,}57 \cdot 10^3 \frac{P_2}{n} = 9{,}57 \cdot 10^3 \frac{7564}{1500} =$$
$$= 48{,}3 \text{ Н·м}.$$

Результаты расчетов, выполненных по пп. 148—153 для ряда значений тока якоря, сведены в табл. 8-24, рабочие характеристики двигателя приведены на рис. 8-37.

В результате расчета и построения рабочих характеристик двигателя установлены номинальные значения:

$$P_н = 7500 \text{ Вт}; \; I_н = 37{,}65 \text{ А}; \; I_{1н} = 39{,}4 \text{ А}; \; P_1 = 8664 \text{ Вт}; \; \eta = 86{,}6\%;$$
$$M_н = 47{,}8 \text{ Н·м}; \; n_н = 1500 \text{ об/мин};$$
$$I_{в.н} = 1{,}73 \text{ А}.$$

Таблица 8-24

Рабочие характеристики двигателя без стабилизирующей обмотки

$I_в$, А	I_a, А	E, В	F_Σ, А	Φ_δ, Вб	n, об/мин	M, Н·м	P_2, Вт	I, А	P_1, Вт	η, %
1,73	9,7	215	1585	0,832	1485	12,1	1891	11,43	2510	75,4
1,73	14,8	213,4	1584	0,832	1475	19,1	2947	16,53	3640	81,1
1,73	19,6	211,9	1518	0,820	1485	25,4	3945	21,33	4680	84,3
1,73	24,5	210,4	1476	0,813	1490	31,7	4931	26,23	5770	85,4
1,73	29,5	208,85	1437	0,806	1490	38,3	5922	31,23	6871	86,2
1,73	34,6	207,3	1400	0,80	1490	44,4	6907	36,33	7993	86,4
1,73	37,1	206,5	1364	0,79	1500	47,1	7387	38,83	8550	86,6
1,73	44,5	204,2	1334	0,781	1500	56,0	8793	46,23	10 180	86,4
1,73	59	199,7	1280	0,75	1530	71,3	11 400	60,73	13 380	85,1

Рабочие характеристики двигателя со стабилизирующей обмоткой

Как следует из характеристики $n = f(P_2)$, с увеличением нагрузки частота вращения двигателя возрастает. Поэтому для повышения устойчивости работы двигателя целесообразно ввести стабилизирующую обмотку.

154. МДС стабилизирующей обмотки по (8-72)

$$F_c \approx F_{qd} = w_c \frac{I}{a_c},$$

где a_c — число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки, принимается равным: $a_c = 1$. Принимаем $w_c = 6$, тогда

$$F_c = w_c I = 6 \cdot 37{,}65 \approx 228 \text{ А}.$$

155. МДС обмотки возбуждения по (8-64)

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} - F_c = 1366 + 220 - 228 = 1358 \text{ А}.$$

156. Принимаем сечение провода обмотки параллельного возбуждения, как и в варианте без стабилизирующей обмотки (см. п. 90):

$$q_в = 0{,}396 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

$$d/d_{из} = 0{,}71 \cdot 10^{-3}/0{,}77 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

плотность тока $J_в = 4{,}45 \cdot 10^6$ А/м².

Число витков на полюс обмотки параллельного возбуждения

$$w_в = \frac{F_в}{J_в q_в} = \frac{1358}{4{,}45 \cdot 10^6 \cdot 0{,}396 \cdot 10^{-6}} = 768.$$

157. Сопротивление обмотки возбуждения по пп. 96 и 97

$$R_в = 68{,}5 \text{ Ом}; \quad R_{в,н} = 83{,}5 \text{ Ом}.$$

158. Длина витка стабилизирующей обмотки

$$l_c \approx l_{в.ср} = 0{,}504 \text{ м}.$$

159. Полная длина стабилизирующей обмотки

$$L_c = 2pw_c l_c = 4 \cdot 6 \cdot 0{,}504 = 12{,}1 \text{ м}.$$

160. Диаметр и сечение проводника стабилизирующей обмотки принимаем, как и для обмотки добавочных полюсов:

$$d/d_{из} = 3{,}15 \cdot 10^{-3}/3{,}50 \cdot 10^{-3};$$

$$q_c = 7{,}8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

161. Сопротивление стабилизирующей обмотки при $\vartheta = 20°$ С

$$R_c = \frac{L_c}{57 \cdot 10^6 q_c} = \frac{12{,}1}{57 \cdot 10^6 \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-6}} = 0{,}0272 \text{ Ом}.$$

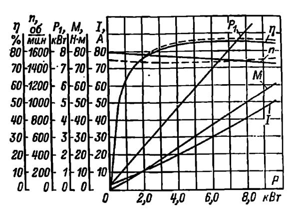


Рис. 8-36. Рабочие характеристики двигателя.

– – – – без стабилизирующей обмотки;
——— со стабилизирующей обмоткой.

162. Сопротивление стабилизирующей обмотки при $\vartheta = 75°$ С

$$R_{c,н} = 1{,}22 R_c = 1{,}22 \cdot 0{,}0272 = 0{,}0332 \text{ Ом}.$$

163. ЭДС якоря при номинальной нагрузке

$$E_н = U_н - I_н (R_a + R_д + R_{c,н}) - 2\Delta U_{щ} = 220 - 38\,(0{,}11 + 0{,}2 + 0{,}0332) - 2 = 205 \text{ В}.$$

164. Магнитный поток в воздушном зазоре при номинальной нагрузке

$$\Phi_{\delta н} = \frac{60 E_н}{pNn_н} = \frac{60 \cdot 205}{2 \cdot 522 \cdot 1500} = 0{,}785 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

Таблица 8-25

Рабочие характеристики двигателя со стабилизирующей обмоткой

$I_в$, А	I_a, А	E, В	F_Σ, А	Φ_δ, Вб	n, об/мин	M, Н·м	P_2, Вт	I, А	P_1, Вт	η, %
1,76	9,9	214,63	1347	$0{,}797 \cdot 10^{-2}$	1550	12,05	1930	11,66	2565	75,2
1,76	14,9	212,93	1342	$0{,}796 \cdot 10^{-2}$	1540	18,5	2962	16,66	3665	80,8
1,76	19,8	211,25	1332	$0{,}793 \cdot 10^{-2}$	1535	25	3972	21,56	4743	83,7
1,76	24,5	209,6	1337	$0{,}792 \cdot 10^{-2}$	1520	31,5	4900	26,26	5777	84,8
1,76	29,5	207,9	1377	$0{,}789 \cdot 10^{-2}$	1515	37,8	5896	31,26	6877	85,7
1,76	34,4	206,2	1372	$0{,}788 \cdot 10^{-2}$	1505	44	6826	36,16	7955	85,8
1,76	37,5	205,2	1362	$0{,}786 \cdot 10^{-2}$	1500	47,8	7430	39,26	8642	86,0
1,76	44,4	202,8	1357	$0{,}785 \cdot 10^{-2}$	1485	56,7	8713	46,16	10 155	85,8
1,76	58,8	197,8	1349	$0{,}784 \cdot 10^{-2}$	1450	75,6	11 280	60,56	13 332	83,9

165. Результирующая МДС обмотки возбуждения на полюс (по характеристике холостого хода, см. рис. 8-35)

$$F_\Sigma = 1362 \text{ А}.$$

166. МДС обмотки возбуждения при номинальной нагрузке

$$F_в = F_\Sigma + F_{qd} - F_с = 1362 + 220 - 228 = 1354 \text{ А}.$$

167. Номинальный ток возбуждения

$$I_{в,н} = \frac{F_в}{w_в} = \frac{1354}{768} = 1,76 \text{ А}.$$

168. Рабочие характеристики двигателя со стабилизирующей обмоткой сведены в табл. 8-25 и приведены на рис. 8-36.

169. Номинальные параметры двигателя со стабилизирующей обмоткой: $P_н = 7500$ Вт; $I_{1н} = 39{,}66$ А; $n = 1500$ об/мин; $M_н = 47{,}8$ Н·м; $I_{в,н} = 1{,}76$ А; $\eta = 86\%$.

Как следует из рис. 8-36, применение стабилизирующей обмотки придает скоростной характеристике $n = f(P_2)$ падающий с ростом мощности характер.

Тепловой расчет по (8-11)

Тепловой расчет выполняется для оценки тепловой напряженности машины и приближенного определения превышения температуры отдельных частей машины.

Для приближенной оценки тепловой напряженности машины необходимо сопротивления обмоток привести к температуре, соответствующей заданному классу изоляции; при классе нагревостойкости B сопротивления умножаются на коэффициент $k_т = 1{,}15$.

170. Расчетные сопротивления обмоток:

$$R_{ат} = R_{ан} \cdot 1,15 = 0,11 \cdot 1,15 = 0,1265 \text{ Ом};$$

$$R_{д,т} = R_{д,н} \cdot 1,15 = 0,2 \cdot 1,15 = 0,23 \text{ Ом};$$

$$R_{в,т} = R_{в,н} \cdot 1,15 = 100 \cdot 1,15 = 115 \text{ Ом}.$$

171. Потери в обмотках:

$$P_{ат} = I_н^2 R_{ат} = 37,65^2 \cdot 0,1265 = 180 \text{ Вт};$$

$$P_{д,т} = I_н^2 R_{д,т} = 37,65^2 \cdot 0,23 = 327 \text{ Вт};$$

$$P_{в,т} = I_{в,н}^2 R_{в,т} = 1,73^2 \cdot 115 = 344 \text{ Вт}.$$

172. Коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности якоря (по рис. 8-32) $\alpha_a = 68$ Вт/(м²·°С).

173. Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря по (8-138)

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{ат}(2l_\delta / l_{аср}) + \Sigma P_{ст}}{\pi D l_a \alpha_a} = \frac{180(2 \cdot 157/644) + 86}{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3} \cdot 68} = 33° \text{ С}.$$

174. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря по (8-140)

$$\vartheta_{из,п} = \frac{P_{ат}\left(\frac{2l_\delta}{l_{аср}}\right)}{Z\Pi_п l_\delta}\left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right) = \frac{180(2 \cdot 157 \cdot 10^{-3}/644 \cdot 10^{-3})}{29 \cdot 58,5 \cdot 10^{-3} \cdot 157 \cdot 10^{-3}} \times \left(\frac{(4,5 + 2,5) \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1,4} + \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{0,16}\right) = 1,24° \text{ С},$$

где $\Pi_п = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1 = \pi(4,5 + 2,5) \cdot 10^{-3} \cdot 42 \cdot 18,22 \cdot 10^{-3} = 58,5 \cdot 10^{-3}$ м;

$$\lambda'_{экв} = 1,4 \text{ Вт/(м·°С)};$$

$$\lambda_{экв} = 0,16 \text{ Вт/(м·°С)}.$$

175. Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря по (8-139)

$$\Delta\vartheta_{пов,л} = \frac{P_{ат}\left(1 - \frac{2l_\delta}{l_{аср}}\right)}{\pi D \cdot 2l_в \alpha_л} = \frac{180\left(1 - \frac{2 \cdot 157 \cdot 10^{-3}}{644 \cdot 10^{-3}}\right)}{\pi \cdot 156 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 46 \cdot 10^{-3} \cdot 68} = 28,2° \text{ С},$$

где $\alpha_л = 68$ Вт/(м²·°С) — коэффициент теплоотдачи с лобовых поверхностей обмотки якоря (см. рис. 8-31); $l_в = 0{,}4\tau = 0{,}4 \cdot 122 \times 10^{-3} = 46 \cdot 10^{-3}$ м — вылет лобовых частей обмотки якоря.

176. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря по (8-141)

$$\Delta\vartheta_{из,л} = \frac{P_{ат}\left(1 - \frac{2l_\delta}{l_{аср}}\right)}{2Z\Pi_л}\left(\frac{h_п}{8\lambda'_{экв}}\right) = \frac{180\left(1 - \frac{2 \cdot 157 \cdot 10^{-3}}{644 \cdot 10^{-3}}\right)}{2 \cdot 29 \cdot 36,2 \cdot 10^{-3}} \frac{26 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1,4} = 0,1° \text{ С},$$

где $\Pi_л = (1 + \pi/2)(r_1 + r_2) + h_1 = (1 + \pi/2)(4,5 + 2,5) \cdot 10^{-3} + 18,22 \times 10^{-3} = 36,2 \cdot 10^{-3}$ м.

177. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха по (8-143)

$$\Delta\vartheta_{аср} = (\Delta\vartheta_a + \Delta\vartheta_{из,п})\frac{2l_\delta}{l_{аср}} + (\Delta\vartheta_{пов,л} + \Delta\vartheta_{из,л})\left(1 - \frac{2l_\delta}{l_{аср}}\right) = (33 + 1,24)\frac{2 \cdot 157 \cdot 10^{-3}}{644 \cdot 10^{-3}} + (28,2 + 0,1)\left(1 - \frac{2 \cdot 157 \cdot 10^{-3}}{644 \cdot 10^{-3}}\right) = 31,2° \text{ С}.$$

178. Сумма потерь, отводимых охлаждающим внутренний объем двигателя воздухом, согласно (8-122)

$$\Sigma P' = \Sigma P - P_{нар} = \Sigma P - (P_{в,т} + P_{д,т}) = 1164 - 0,1(344 + 327) \approx 1097 \text{ Вт}.$$

179. Условная поверхность охлаждения двигателя по (8-137)

$$S_{охл} = \pi D_н (l_\delta + 2l_{выл}) = \pi \cdot 310 \cdot 10^{-3} \times$$
$$\times (157 \cdot 10^{-3} + 92 \cdot 10^{-3}) = 0{,}243 \text{ м}^2.$$

180. Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{воз} = \frac{\Sigma P'}{S_{охл}\,\alpha_н} = \frac{1097}{0{,}243 \cdot 650} = 6{,}9° \text{ С}.$$

181. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta'_{aср} = \Delta\vartheta_{aср} + \Delta\vartheta_{воз} = 31{,}2 + 6{,}9 =$$
$$= 38{,}1° \text{ С}.$$

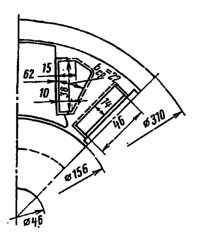


Рис. 8-37. Эскиз междуполюсного окна двигателя (пунктиром указаны поверхности охлаждения обмоток главных и добавочных полюсов).

182. Превышение температуры наружной поверхности катушки возбуждения над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta\vartheta_{п.в} = \frac{\Delta P'_{в.т}}{2pS_в\,\alpha_в} = \frac{0{,}9 \cdot 344}{4 \cdot 32{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 50} =$$
$$= 47{,}2° \text{ С},$$

где $P'_{в.т}$ определяется согласно (8-122) и (8-125);

$S_в$ — наружная поверхность охлаждения катушки обмотки возбуждения:

$$S_в = l_{в.ср}\,П_в = 0{,}504 \cdot 65 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 32{,}8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

(на рис. 8-37 периметр катушки $П_в$ отмечен пунктиром).

183. Перепад температуры в изоляции катушки

$$\Delta\vartheta_{из.в} = \frac{kP'_{в.т}}{2p\,S_в}\left(\frac{b_{к.ср}}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right) =$$
$$= \frac{(1-0{,}1) \cdot 344}{4 \cdot 32{,}8 \cdot 10^{-3}}\left(\frac{22 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1{,}4} + \right.$$
$$\left. + \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}16}\right) = 7{,}5° \text{ С},$$

где $P'_{п.т}$ — часть теплоты катушки обмотки возбуждения через полюс, определяется согласно (8-122), (8-125).

184. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta'_{ср.в} = \Delta\vartheta_{п.в} + \Delta\vartheta_{из.в} + \Delta\vartheta_{воз} =$$
$$= 47{,}2 + 7{,}5 + 6{,}9 = 61{,}6° \text{ С}.$$

185. Превышение температуры наружной поверхности добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta\vartheta_{п.д} = \frac{kP'_{д.т}}{2pS_д\,\alpha_д} = \frac{0{,}9 \cdot 327}{4 \cdot 18{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 50} =$$
$$= 79{,}5° \text{ С},$$

где

$$S_д = l_{д.ср}\,П_д = 371 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 18{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$\alpha_д = 50$ Вт/м² (см. рис. 8-32).

186. Перепад температуры в изоляции катушки добавочного полюса по 8-146

$$\Delta\vartheta_{из.д} = \frac{P'_{д.т}}{2pS_д}\,\frac{b_{кт.д}}{2\lambda'_{экв}} =$$
$$= \frac{0{,}9 \cdot 327}{4 \cdot 18{,}5 \cdot 10^{-3}}\,\frac{14 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1{,}4} = 4{,}9° \text{ С};$$

катушки добавочных полюсов не имеют наружной изоляции.

187. Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_{д.ср} = \Delta\vartheta_{п.д} + \Delta\vartheta_{из.д} + \Delta\vartheta_{воз} =$$
$$= 79{,}5 + 4{,}9 + 6{,}9 = 91{,}3° \text{ С}.$$

188. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_к = \frac{P_щ + P_{т.щ}}{S_к\,\alpha_к} =$$
$$= \frac{80 + 47}{\pi \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 58 \cdot 10^{-3} \cdot 140} = 49{,}6° \text{ С}.$$

Таким образом, превышения температуры обмотки якоря, обмотки возбуждения и коллектора ниже предельных допускаемых значений для класса изоляции В. Для проводников обмотки добавочных полюсов марки ПСД (класс изоляции F) среднее превышение температуры $\Delta\vartheta_{д.ср} = 91{,}3°$ С также не превышает предельного допускаемого значения.

Вентиляционный расчет

Разрабатываемый двигатель имеет аксиальную систему вентиляции с самовентиляцией, обеспечиваемой встроенным вентилятором центробежного типа.

189. Необходимое количество охлаждающего воздуха по (8-154)

$$Q_{воз} = \frac{\Sigma P'}{1100\Delta\vartheta'_{воз}} = \frac{1097}{1100 \cdot 13{,}8} = 0{,}072 \text{ м}^3,$$

где $\Sigma P'$ — сумма потерь, отводимых ох-

лаждающим внутренний объем машины воздухом (п. 178);

$\Delta\vartheta'_{воз}$ — превышение температуры воздуха;

$$\Delta\vartheta'_{воз} \approx 2\Delta\vartheta_{воз} = 2\cdot 6,9 = 13,8.$$

190. Принимаем наружный диаметр центробежного вентилятора равным приблизительно 0,9 d_c (где d_c — внутренний диаметр станины) по (8-157)

$$D_2 = 0,9d_c = 0,9\cdot 276\cdot 10^{-3} = 250\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

191. Окружная скорость вентилятора (по наружному диаметру)

$$u_2 = \frac{\pi D_{2в} n}{60} = \frac{\pi\cdot 250\cdot 10^{-3}\cdot 1500}{60} = 19,7 \text{ м/с}.$$

192. Внутренний диаметр колеса вентилятора по (8-158)

$$D_{1в} = (1,25\div 1,3)\, D = 1,25\cdot 156\cdot 10^{-3} = 195\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

193. Окружная скорость вентилятора (по внутреннему диаметру)

$$u_1 = \frac{\pi D_{1в} n}{60} = \frac{\pi\cdot 195\cdot 10^{-3}\cdot 1500}{60} = 15,3 \text{ м/с}.$$

194. Ширина лопаток вентилятора по (8-159)

$$b_{л,в} = (0,12\div 0,15)\, D_{2в} = 0,15\cdot 250\cdot 10^{-3} = 38\cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

195. Число лопаток принимаем $N_л = 17$.

196. Давление вентилятора при холостом ходе по (8-160)

$$H_0 = \eta_{a0}\,\rho\left(u_2^2 - u_1^2\right) = 0,6\cdot 1,23\,(19,7^2 - 15,3^2) = 114 \text{ Па},$$

где η_{a0} — аэродинамический КПД вентилятора в режиме холостого хода: $\eta_{a0} \approx 0,6$.

197. Максимально возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания по (8-161)

$$Q_{вmax} = 0,42 u_2 S_2 = 0,42\cdot 19,7\cdot 0,0275 = 0,227 \text{ м}^3/\text{с},$$

где S_2 — входное сечение вентилятора;

$$S_2 = 0,92\pi D_{2в}\, b = 0,92\pi\cdot 250\cdot 10^{-3}\cdot 38\times 10^{-3} = 0,0275 \text{ м}^2.$$

198. Аэродинамическое сопротивление Z вентиляционной системы машины (см. рис. 5-20)

$$Z = 18\cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}^2/\text{м}^6.$$

199. Действительный расход воздуха по (8-162)

$$Q_{воз} = Q_{вmax}\sqrt{\frac{H_0}{H_0 + ZQ_{вmax}}} = 0,227\sqrt{\frac{114}{114 + 18\cdot 10^3\cdot 0,227^2}} = 0,078 \text{ м}^3/\text{с}.$$

200. Действительное давление вентилятора

$$H = \frac{H_0\, ZQ^2_{вmax}}{H_0 + ZQ^2_{вmax}} = \frac{114\cdot 18\cdot 10^3\cdot 0,227^2}{114 + 18\cdot 10^3\cdot 0,227^2} = 101,5 \text{ Па}.$$

201. Мощность, потребляемая вентилятором,

$$P_{вент} = \frac{HQ^2_{воз}}{\eta_э} = \frac{101,5\cdot 0,078}{0,2} = 79 \text{ Вт},$$

где $\eta_э$ — КПД вентилятора.

202. Потери мощности на вентиляцию и в подшипниках (уточнение п. 134):

$$P_{т,в} + P_{вент} = 100 \text{ Вт}.$$

203. Номинальный КПД с учетом уточнения потерь мощности на вентиляцию и в подшипниках

$$\eta_н = 86,2\%.$$

Заключение

Расчет массы двигателя и механический расчет вала выполняются согласно ранее приведенным примерам расчетов асинхронных и синхронных машин.

При разработке конструкции двигателя необходимо использовать материалы § 8-1, чертежи серийных конструкций, ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала.

Механический расчет коллектора и крепления главных и добавочных полюсов выполняют по методике, изложенной в гл. 9.

Глава девятая

ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

9-1. МАГНИТОПРОВОД СТАТОРА

Магнитопроводы статора машин переменного тока общего назначения выполняют шихтованными из электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. При внешнем диаметре магнитопровода до 990 мм он выполняется из целых листов (рис. 9-1), а при больших диаметрах со-

бирают из отдельных сегментов (рис. 7-14). По внутренней поверхности магнитопровода штампуют пазы требуемой формы для размещения в них обмотки статора. Так как в размерах отдельных зубцов имеется разброс, обусловленный допусками при изготовлении штампа, то при шихтовке магнитопровода

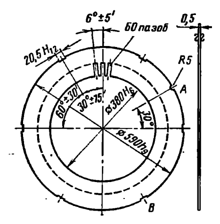


Рис. 9-1. Пример чертежа листа статора.

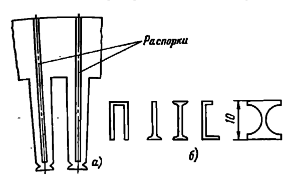


Рис. 9-2. Крайний лист магнитопровода статора с приваренными к нему распорками (*а*) и формы распорок (*б*).

листы укладываются в одно и то же положение относительно друг друга по шихтовочному знаку *А*, который вырубают на внешней их поверхности. Для изоляции листов друг от друга их после снятия заусенцев лакируют. Если лист изготовляют из стали 2013, то их подвергают термообработке, в результате которой стабилизируются потери в стали и создается поверхностный оксидный изоляционный слой.

При большой длине сердечника его подразделяют на пакеты, между которыми образуются вентиляционные радиальные каналы шириной 10 мм. Каналы образуют путем приварки к крайним листам пакета распорок (рис. 9-2), имеющих чаще всего двутавровое сечение.

При наружном диаметре до 452—493 мм сердечники набирают из целых листов, насаживая их на цилиндрическую оправку диаметром, равным внутреннему диаметру

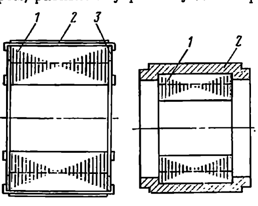


Рис. 9-3. Магнитопровод статора, стянутый скобами.

1 — магнитопровод; *2* — скоба; *3* — нажимная шайба.

Рис. 9-4. Магнитопровод статора, залитый в оболочку.

1 — магнитопровод; *2* — оболочка (станина).

статора. Для предотвращения деформации (распушения) относительно тонких зубцов крайние торцевые листы магнитопровода штампуют из более толстых листов стали или их попарно сваривают точечной сваркой. Собранный таким образом магнитопровод прессуют и после этого скрепляют по наружному диаметру П-образными скобами (рис. 9-3). Скобы приваривают к торцам и наружной поверхности сердечника или, как это сделано у машин серии 4А, укладывают в специальные канавки *В* (рис. 9-1) в форме ласточкина хвоста на внешней поверхности магнитопровода (см. рис. 6-2, *б*). После укладки обмотки и пропитки ее лаком сердечник запрессовывают в станину и закрепляют стопорными винтами.

В асинхронных машинах небольшой мощности ($h<63$ мм) спрессованный магнитопровод заливают в форме алюминием или алюминиевым сплавом (рис. 9-4). Заливка захватывает внешнюю поверхность и частично торцы магнитопровода, в результате чего он оказывается закрепленным в алюминиевой оболоч-

ке. Эта оболочка не только скрепляет магнитопровод, но и является станиной машины.

При внешних диаметрах магнитопровода от 520 до 990 мм он собирается из листов, которые укладываются в расточенный по второму классу корпус или на обработанные ребра (рис. 9-5). Сердечник запрессовывают между двумя нажимными шайбами (кольцами). Для создания осевого сжатия у одного края ребра имеется выступ, а у другого края — канавка, в которую вставляется запорная шпонка. Нажимная шпонка передает усилие сжатия на магнитопровод через нажимные пальцы — стальные пластинки, приваренные к крайним листам. Применяют и другой способ изготовления магнитопроводов, когда его собирают на оправке и скрепляют планками, которые приваривают к нажимным шайбам и частично к спинке магнитопровода. После укладки обмотки магнитопровод запрессовывают.

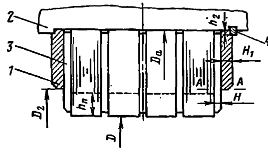


Рис. 9-5. Магнитопровод статора, запрессованный нажимными шайбами.

1 — нажимная шайба; *2* — ребро станины; *3* — нажимные пальцы; *4* — запорная шпонка.

При внешних диаметрах магнитопровода более 990 мм он, как уже отмечалось, собирается из сегментов. Различают слоевую шихтовку, при которой каждый слой состоит из целого числа сегментов, и винтовую, при которой в каждом слое последний сегмент перекрывает первый.

Для шихтовки магнитопровода из сегментов существует несколько способов крепления листов активной стали в станине. В машинах общего назначения наибольшее распространение находит способ крепления на сборочных шпильках *5*, которые одновременно являются и стяжными (рис. 9-6). Базирование магнитопровода в радиальном направлении происходит на ребрах станины *1*.

При механическом расчете магнитопровода проверяют прочность стягивающих его узлов.

При запрессовке магнитопровода шайбами проверяют прочность этих шайб, нажимных пальцев и шпонки. При стяжке магнитопровода шпильками выбирают их размер и число.

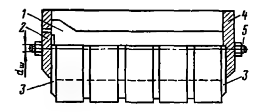


Рис. 9-6. Магнитопровод статора, стянутый шпильками.

1 — ребро станины; *2* — нажимное кольцо; *3* — нажимные пальцы; *4* — глухая стенка станины; *5* — сборочные шпильки.

При расчете исходят из того, что давление в запрессованном сердечнике q_c находится в пределах $7\cdot10^5$—10^6 Па. Принимают, что образование веера в торцах зубцового слоя не снижает давления и реакции запрессовки. Такое допущение упрощает расчетные формулы и идет в запас прочности.

Расчет нажимных шайб, пальцев и шпонок. На нажимные пальцы и шайбу действует изгибающий момент, созданный равномерным давлением спрессованного магнитопровода.

Полное усилие запрессовки равно, Н:

$$Q_з = q_c\left(T_{c1}D_a^2 - S_п\right), \qquad (9\text{-}1)$$

где T_{c1} — коэффициент, который определяется в зависимости от $\alpha = D/D_a$ (см. рис. 9-5): $T_{c1} = 0{,}785(1-\alpha^2)$;

$S_п$ — площадь сечения всех пазов статора, м²;

D_a — наружный диаметр магнитопровода статора, м.

Диаметр равнодействующей усилия запрессовки, м,

$$D_р = \frac{T_2 D_a^3 - S_п\left(D + h_п\right)}{T_{c1} D_a^2 - S_п}, \qquad (9\text{-}2)$$

где коэффициент $T_2=0{,}524(1-\alpha^3)$;

$h_п$ — высота паза, м.

Момент, изгибающий нажимную шайбу, Н·м,

$$M_1=\frac{Q_з(D_a-D_р)}{2}. \qquad (9\text{-}3)$$

Напряжение изгиба, Па,

$$\sigma_1=\frac{6M_1}{\pi\left(\frac{D_a+D_2}{2}\right)H_1^2}, \qquad (9\text{-}4)$$

где D_a, D_2, H_1 — в метрах (рис. 9-5).

Допустимое напряжение для стали Ст3 $\sigma_{доп}=600\cdot10^5$ Па.

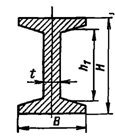


Рис. 9-7. Размеры двутаврового сечения нажимного пальца.

Изгибающий момент, действующий на нажимные пальцы крайних листов сердечника в сечении A—A (см. рис. 9-5), Н·м,

$$M_2=\frac{q_c}{Z_1}\left[\left(\frac{D_2}{10}\right)^3T_3-\right.$$

$$\left.-\frac{S_п}{2}(D_2-D-h_п)\right], \qquad (9\text{-}5)$$

где $T_3=131(1-\alpha_1^2)(1+2\alpha_1)$;

$\alpha_1=D/D_2$;

Z_1 — число пазов.

Напряжение изгиба пальцев, Па, при двутавровом сечении пальца (рис. 9-7)

$$\sigma_2=\frac{6HM_2}{BH^3-b_1h_1^3}, \qquad (9\text{-}6)$$

где B, H, h_1, $b_1=B-t$ — размеры в метрах по рис. 9-7;

при прямоугольном сечении пальца

$$\sigma_2'=\frac{6M_2}{BH^2}. \qquad (9\text{-}7)$$

Допустимое напряжение для стали Ст3 равно $1600\cdot10^5$ Па; для комбинированных тавров из стали Ст3 $1900\cdot10^5$ Па.

Напряжение смятия дуговой шпонки, Па,

$$\sigma_{см}=\frac{Q_з}{mb_2h_2}, \qquad (9\text{-}8)$$

где m — число шпонок;

b_2, h_2 — размеры контактной поверхности одной шпонки, м.

Допустимое напряжение $\sigma_{см}=1500\cdot10^5$ Па.

Пример расчета. Исходные данные: синхронный двигатель $P_н=200$ кВт, $D_a=74\cdot10^{-2}$ м, $D=54\cdot10^{-2}$ м, $D_2=65{,}4\times10^{-2}$ м, $Z_1=72$, $h_п=4{,}65\cdot10^{-2}$ м, $b_п=1{,}23\cdot10^{-2}$ м. Размеры пальца: $H=1\times10^{-2}$ м, $B=0{,}6\cdot10^{-2}$ м. Контактная поверхность шпонки $b_2\times h_2=4\cdot10^{-2}\cdot0{,}5\times10^{-2}$ м², для шайбы $H_1=1{,}7\cdot10^{-2}$ м, число шпонок $m=6$,

$$\alpha=\frac{54}{74}=0{,}73,\quad T_{c1}=0{,}785(1-$$

$$-0{,}73^2)=0{,}37.$$

Площадь сечения всех пазов статора

$$S_п=72\cdot1{,}23\cdot10^{-2}\cdot4{,}65\cdot10^{-2}=410\cdot10^{-4}\ м^2$$

Усилие запрессовки по (9-1)

$$Q_з=8\cdot10^6(0{,}37\cdot74^2\cdot10^{-4}-410\cdot10^{-4})=$$

$$=13\cdot10^4\ H.$$

Из (9-2)

$$D_р=\frac{0{,}32\cdot74^3\cdot10^{-6}-410\cdot10^{-4}(54+}{0{,}37\cdot74^2\cdot10^{-4}-}\rightarrow$$

$$\rightarrow\frac{+4{,}65)\cdot10^{-2}}{-410\cdot10^{-4}}=65\cdot10^{-2}\ м;$$

$$T_2=0{,}524(1-0{,}73^3)=0{,}32.$$

Изгибающий момент по (9-3)

$$M_1=\frac{13\cdot10^4(74-65)\cdot10^{-2}}{2}=58{,}5\cdot10^2\ Н\cdot м$$

Напряжение изгиба по (9-4)

$$\sigma_1=\frac{6\cdot58{,}5\cdot10^2}{\pi\left(\frac{74+65{,}4}{2}\right)\cdot10^{-2}\cdot1{,}7^2\cdot10^{-4}}=$$

$$=555\cdot10^5\ Па,$$

где при $\frac{D}{D_2}=\frac{54}{65{,}4}=0{,}83$ получаем $T_3=$

$$=131(1-0{,}83)^2(1+2\cdot0{,}83)=10.$$

Из (9-5)

$$M_2=\frac{8\cdot10^6}{72}\left[\left(\frac{65{,}4}{10}\right)^3\cdot10^{-6}\cdot10-\right.$$

$$\left.-\frac{410\cdot10^{-4}}{2}(65{,}4-54-4{,}65)\,10^{-2}\right]=$$

$$=15{,}7\ Н\cdot м.$$

Напряжение изгиба пальцев по (9-7)

$$\sigma_2=\frac{6\cdot15{,}7}{0{,}6\cdot1^2\cdot10^{-6}}=1570\cdot10^6\ Па.$$

Напряжение смятия по (9-8)

$$\sigma_{см} = \frac{13\cdot 10^4}{6\cdot 4\cdot 10^{-2}\cdot 0,5\cdot 10^{-2}} = 1080\cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Расчет числа и диаметра шпилек производится по усилию запрессовки сердечника, определяемой по (9-1).

Число шпилек

$$m_{ш} \geqslant Q_з/\sigma S_0, \qquad (9\text{-}9)$$

где $S_0 = \pi d_{0ш}^2/4$ — площадь сечения шпильки по нарезке, м²;

$d_{0ш}$ — внутренний диаметр резьбы шпильки, м.

Допустимое напряжение σ для шпилек из стали марки Ст3 $1600\times\times 10^5$ Па, из стали марки Ст5 $2100\cdot 10^5$ Па.

Нажимные пальцы рассчитываются так же, как и в предыдущем случае.

Пример расчета. Синхронный двигатель: $D_a=1,73$ м, $D=1,2$ м, $Z_1=72$, $b_п=1,87\cdot 10^{-2}$ м, $h_п=8,5\cdot 10^{-2}$ м,

$$\alpha = \frac{1,20}{1,73} = 0,69, \quad T_{ci} = 0,785(1 - 0,69^2) = 0,41.$$

Из (9-1)

$$Q_з = 8\cdot 10^6 (0,41\cdot 1,73^2 - 72\cdot 1,87\cdot 10^{-2}\times\times 8,5\cdot 10^{-2}) = 23\cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Берем шпильки М36 ($S_0=7,4\cdot 10^{-4}$ м²) из стали Ст5.

По (9-9)

$$m_{ш} \geqslant \frac{23\cdot 10^5}{2100\cdot 10^5\cdot 7,4\cdot 10^{-4}} \geqslant 15,1.$$

Число шпилек выбирается 16.

Бандажные кольца обмотки статора. При протекании тока по обмотке статора на ее лобовые части действуют электродинамические силы, которые стремятся отогнуть их к сердечнику. Особенно велики эти силы при внезапных коротких замыканиях, когда токи возрастают в несколько раз по сравнению с их номинальным значением. Для предупреждения отгиба лобовых частей применяется крепление их с помощью бандажных колец (рис. 9-8). Необходимость применения бандажных колец определяется вылетом лобовых частей L и высотой паза $h_п$. Если длина вылета при данной высоте паза лежит выше кривой (рис. 9-8), то установка бандажных колец необходима. Число колец $m_к$ определяется из расчета: одно кольцо на каждые 100 мм вылета лобовой части сверх значения, ограниченного кривой на рис. 9-8.

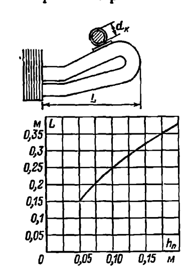


Рис. 9-8. К определению числа бандажных колец.

Сечение колец выбирают по растягивающему усилию, испытываемому кольцом при внезапном коротком замыкании, Н,

$$Q_к = \frac{1,11}{m_к}\left(\frac{D}{2px_*}\right)^2\cdot 10^4, \qquad (9\text{-}10)$$

где D — внутренний диаметр сердечника, м;

$2p$ — число полюсов;

x_* — относительное переходное реактивное сопротивление обмотки статора (находится из электромагнитного расчета); для предварительных расчетов можно принять: у синхронных явнополюсных машин $x_*=0,2\div 0,3$; у короткозамкнутых асинхронных двигателей $x_*=0,15\div 0,25$; у асинхронных двигателей с фазным ротором $x_*=0,25\div 0,4$.

Напряжение растяжения в кольце

$$\sigma = Q_к/S_к, \qquad (9\text{-}11)$$

где $S_к=\pi d_к^2/4$;

$d_к$ — диаметр кольца, м.

Тогда

$$d_к = \sqrt{\frac{4Q_к}{\pi\sigma}}. \qquad (9\text{-}12)$$

При доброкачественной кузнечной сварке кольца из Ст3 допустимое напряжение растяжения принимают $\sigma = 1800 \cdot 10^5$ Па. Бандажные кольца изготовляются из прутков с диаметрами 10, 12, 16, 20, 24 мм и

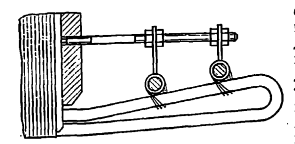


Рис. 9-9. Крепление бандажных колец с помощью шпилек.

прутков квадратного сечения 22×22 и 32×32 мм². В машинах с наружным диаметром магнитопровода статора более 1 м к бандажным кольцам привариваются петли, которые крепятся с помощью шпилек к нажимным шайбам статора (рис. 9-9).

Число шпилек выбирают в зависимости от диаметра сердечника: берут 4 шпильки при диаметрах от 1 до 2 м, 6 шпилек при диаметрах от 2 до 2,6 м и 8 шпилек при диаметрах свыше 2,6 м.

Пример расчета. $D = 1{,}2$ м, $h_п = 8{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $x_* = 0{,}15$, вылет лобовой части обмотки 23,4 см.

При высоте паза $h_п = 75$ мм вылет лобовой части равен 23,4 см, поэтому бандажные кольца необходимы ($23{,}4 > 21{,}5$ см). Берем $m = 1$, тогда:

по (9-10)

$$Q_к = \frac{1{,}11}{1}\left(\frac{1{,}2}{6 \cdot 0{,}15}\right)^2 \cdot 10^4 = 1{,}98 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

по (9-12)

$$d_к = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}98 \cdot 10^4}{1800 \cdot 10^5}} = 0{,}0118 \text{ м}.$$

Для изготовления кольца выбирается пруток диаметром 12 мм.

9-2. СТАНИНЫ

Станины статоров электрических машин выполняются литыми, сварными или из цельнотянутых труб. В машинах переменного тока станина является каркасом, в котором располагается магнитопровод статора с обмоткой. Конструкция станины зависит от степени защиты машины.

Для асинхронных двигателей закрытого исполнения (степень защиты IP44 (см. рис. 6-1) применяют литые чугунные станины цилиндрической формы. Для улучшения охлаждения машины на внешней поверхности станины отливают продольные ребра (при $h \leqslant 355$ мм) или приваривается распределенный воздухоохладитель, состоящий из двух-трех рядов стальных трубок диаметром 32—40 мм (при $h \geqslant 400$ мм). Между ребрами или через трубки воздухоохладителя наружным вентилятором, расположенным на валу машины, прогоняется охлаждающий воздух. Высоту ребер $h_р$ выбирают равной $(0{,}15—0{,}2)h$. Число ребер, приходящихся на четверть поверхности станины, выбирают от 8 до 12.

Внутренняя поверхность станины у машин небольшой мощности гладкая, обработана для посадки магнитопровода статора, а у более крупных машин (при $h > 400$ мм) для закрепления сердечника на ней предусматривают продольные ребра.

У двигателей защищенного исполнения (степень защиты IP23) (см. рис. 6-2) станины выполняют литыми с гладкой внешней поверхностью, а на внутренней поверхности имеются 4—6 ребер для посадки магнитопровода. В боковых частях станины предусматривают отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Отверстия закрываются жалюзи, которые штампуют из стали или выполняют из алюминиевых сплавов.

В синхронных машинах относительно небольшой мощности станины также выполняются литыми (рис. 9-10).

Для машин переменного тока большой мощности (больше сотен киловатт) чаще всего применяются сварные станины. Сварные станины выполняются в виде кольцевой коробки П-образного сечения и состоят из ряда продольных балок, приваренных к боковым кольцам

(рис. 9-11). В машинах общего назначения чаще всего применяются станины с «глухой» наружной стенкой (см. рис. 9-6). Одна из торцевых наружных стенок *4* такой станины имеет отверстие, диаметр которого меньше внешнего диаметра магнитопровода (глухая стенка). К этой стенке приваривают нажимные пальцы *3*. Вторая торцевая стенка открытая, и через нее ведут шихтовку сердечника. К этой стенке после прессовки сердечника приваривается нажимное кольцо *2* с пальцами *3*.

В машинах постоянного тока станина, помимо того что к ней прикрепляются главные и дополнительные полюсы, является частью магнитопровода. В целях уменьшения размеров подшипниковых щитов и повышения их жесткости иногда увеличивают длину станины. Развитая в сторону подшипниковых щитов часть станины может иметь меньшую толщину. Толщина станины определяется из электромагнитного расчета. Полученные размеры станины обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В машинах постоянного тока станины как при защищенном (степень защиты IP22), так и при закрытом исполнении (степень защиты IP44) (см. рис. 8-3) имеют гладкую внешнюю поверхность. При высотах оси вращения до 200 мм станины выполняются из цельнотянутых стальных труб, а при больших высотах оси вращения свариваются из толстолистовой стали, свернутой в трубу. Сварочный шов целесообразно располагать по линии главных полюсов, чтобы исключить влияние этого шва на распределение потока. В удлиненных станинах предусматривают люки для обслуживания коллектора и подачи охлаждающего воздуха.

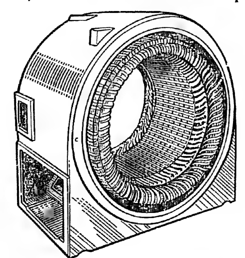


Рис. 9-10. Литая станина с впрессованным магнитопроводом.

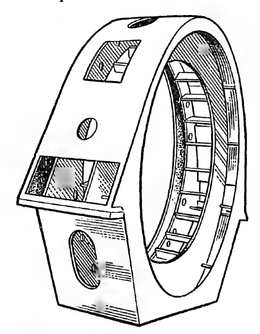


Рис. 9-11. Сварная станина.

Для улучшения работы двигателей постоянного тока при питании их от тиристорных преобразователей целесообразно станины выполнять шихтованными из листов электротехнической стали толщиной 1 мм.

При проектировании станины электрической машины в нижней ее части должны быть предусмотрены лапы, с помощью которых она крепится к фундаменту. Расположение лап на станине должно быть таким, чтобы можно было свободно вставлять в их отверстия крепящие машину болты, а в машинах постоянного тока, к тому же, не затруднять установку и выем болтов, крепящих полюсы. Опорные лапы либо отливаются заодно со станиной, либо изготовляются отдельно. Кроме того, на станине должны быть окна и приваренные или отлитые основания для размещения коробки вводных проводов.

В верхней части станины делают приливы или приваривают бо-

бышки, в которых высверливаются отверстия и нарезается резьба для рым-болтов. В малых машинах делается один рым-болт, а у более крупных — два. При массе машины менее 30 кг рым-болт отсутствует. Станины должны иметь зажим для заземления.

При внешнем диаметре станины менее 1—1,5 м к ее торцам болтами привертываются подшипниковые щиты, для чего на торцах должны быть выполнены кольцевые заточки для посадки и предусмотрены приливы или ушки с нарезанными отверстиями для крепления щитов. При больших диаметрах станин применяют стояковые подшипники.

В последнее время получили распространение станины прямоугольной формы. Машина такой формы лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн, окон, станков и т. п. Кроме того, при прямоугольной форме станин удается лучше использовать ее внутренний объем и за счет этого уменьшить размеры машины.

9-3. ВАЛЫ

Электрические машины общего назначения в большинстве случаев выполняют с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несет на себе всю массу вращающихся частей, через него передается вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом (для двигателя) или с приводным двигателем (для генератора) через ременную или зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен также иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т. е. наступает явление резонанса), при которой резко увеличиваются прогиб вала и вибрация машины.

Валы изготовляют из углеродистых сталей преимущественно из стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке.

Размеры вала определяют при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с бо́льшим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем (магнитопровод, коллектор, подшипники, вентилятор, контактные кольца и т. д.). При переходе с одного диаметра вала на другой для предупреждения недопустимой концентрации напряжений в местах переходов должны быть предусмотрены закругления (галтели) максимально возможного радиуса. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Иногда в машинах постоянного тока для фиксации положения пакета магнитопровода якоря на валу предусматривается упорный буртик. Диаметр вала, см, в той его части, где размещается сердечник, предварительно можно выбрать по формуле

$$d_c = k_в \sqrt[3]{P_н/n_н}, \qquad (9\text{-}13)$$

где $P_н$, $n_н$ — номинальные значения соответственно мощности, кВт, и частоты вращения, об/мин;

$k_в$ — коэффициент, значение которого следует принять равным 24—29 для машины средней мощности и 18—20 для крупных машин (от 400 кВт и выше).

Таблица 9-1

Цилиндрические концы валов

d, мм	l_0, мм Исполнение 1	l_0, мм Исполнение 2	d, мм	l_0, мм Исполнение 1	l_0, мм Исполнение 2
7 9 11 14	16 20 23 30	— — — —	80 85 90 95	170	130
16 18 19	40	28	100 110 125	210	165
22 24	50	36	140	250	200
			150	250	210
28	60	42	160 170 180	300	240
32 38	80	58			
42 48 55	100	82	190 200 220	350	280
			250	410	330
60 65 70 75	140	105	280 320	470	380
			360	550	450

Окончательные размеры вала устанавливаются после его расчетов на жесткость и прочность. Свободный конец может иметь цилиндрическую или коническую форму. Широкое применение имеют валы с цилиндрическим концом. На этот конец насаживаются полумуфта, или шкив, или шестерня, которые закрепляются с помощью шпонки. На валу имеется еще ряд шпонок для закрепления различных узлов, размещаемых на валу. В целях упрощения обработки вала ширину всех шпонок желательно брать такой же, как и свободного конца.

Размеры свободного конца вала (рис. 9-12) должны быть выбраны в соответствии с ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75 (табл. 9-1). Концы валов предусматриваются двух исполнений — длинные и короткие.

Шпонки для свободного конца вала выбирают по стандартам.

При конструировании следует также согласовать размеры шеек вала, на которых размещаются подшипники, с размерами выбранных подшипников.

Расчет вала на жесткость. При расчете прогиба вала принимают, что вся масса активной стали рото-

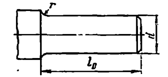


Рис. 9-12. Свободный конец вала.

ра с обмоткой и коллектором (в машинах постоянного тока) и участка вала под ними приложена в виде сосредоточенной силы $G_р$ посередине длины магнитопровода. Массой частей вала ближе к опорам можно пренебречь. Массу указанных частей определяют по данным электромагнитного расчета.

Принимая, что ротор асинхронного двигателя или якорь машины постоянного тока представляют собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м³, его массу можно определить как

$$m_р = 6500 D_2^2 l_2;$$

приближенно масса коллектора равна:

$$m_к = 6100 D_к^2 l_к,$$

где D_2 — внешний диаметр ротора (якоря), м;

l_2 — длина сердечника без радиальных вентиляционных каналов, м;

$D_к$, $l_к$ — внешний диаметр и длина коллектора, м.

В машинах постоянного тока в том случае, когда коллектор насаживается на вал, расчет прогиба проводится исходя из приведенной силы тяжести:

$$G_р = G'_р + \varphi G_к = 9{,}81(m'_р + \varphi m_к), \quad (9\text{-}14)$$

где $m'_р$ — масса якоря с обмоткой и валом, кг;

$m_к$ — масса коллектора с валом под ним, кг;

φ — коэффициент, который берут из табл. 9-2 в зависи-

Таблица 9-2

b/l	a_1/l					
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,3	0,6	0,84	1,02	1,12	1,12	1
0,4	0,55	0,77	0,94	1,03	1	0,86
0,5	0,56	0,78	0,94	1	0,94	0,78
0,6	0,62	0,86	1	1,03	0,94	0,77
0,7	0,75	1	1,12	1,12	1,02	0,82

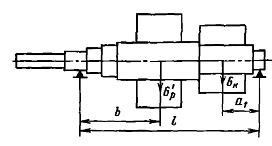


Рис. 9-13. К определению коэффициента φ.

мости от отношений b/l и a_1/l (рис. 9-13).

При креплении корпуса коллектора к корпусу якоря масса коллектора учитывается как прибавка к массе якоря.

При определении прогиба вала воспользуемся аналитическим методом. Для этого необходимо иметь эскиз вала со всеми его размерами (рис. 9-14). Вал разбивают на три участка: a, b и c. Прогиб вала, м, под действием силы $G_р$ на участке, соответствующем середине пакета,

$$f_G = \frac{G_р}{3El^2}\left(S_b a^2 + S_a b^2\right), \quad (9\text{-}15)$$

где E — модуль упругости: $E = 2{,}06 \cdot 10^{11}$ Па;

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}; \; S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}; \quad (9\text{-}16)$$

J_i — экваториальный момент инерции вала, м⁴; для сплошного вала диаметром d имеем $J = \pi d^4/64$, для полого вала $J = \frac{\pi\left(d^4 - d_{отв}^4\right)}{64}$;

$G_р = 9{,}81\, m_р$ — сила тяжести ротора, Н.

В (9-15) все линейные размеры должны быть взяты в метрах. Расчет f_G удобно представить в виде таблицы (см. пример расчета).

Электрическая машина сочленяется с исполнительным механизмом или двигателем одним из указанных способов: через ременную передачу, зубчатую передачу или через упругую муфту. При работе машины возникают поперечные силы $F_п$, приложенные к выступающему концу вала и соответственно вызванные натяжением ремня, давлением на зубец шестерни или же неточностью сопряжения валов и изготовлением деталей муфты. Эту силу $F_п$, Н, можно определить как

$$F_п = k_п M_н / R, \quad (9\text{-}17)$$

где $M_н$ — номинальный вращающий момент, Н·м:

для двигателя

$$M_н = 9550\, P_н / n_н,$$

для генератора

$$M_н = 9550\, P_н / \eta\, n_н; \quad (9\text{-}18)$$

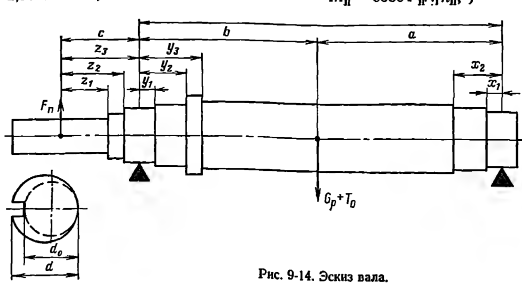


Рис. 9-14. Эскиз вала.

$P_п$, $n_п$ — номинальные мощность, кВт, и частота вращения, об/мин;

$k_п$ — коэффициент; при передаче упругой муфтой $k_п=0{,}3$, при передаче зубчатыми шестернями $k_п=1{,}05$, при передаче клиновыми ремнями $k_п=1{,}8$, при передаче плоскими ремнями $k_п=3$;

R — радиус делительной окружности шестерни или радиус по центрам пальцев муфты или окружности шкива, м.

Сила $F_п$ вызывает дополнительный прогиб вала под серединой магнитопровода:

$$f_п = \frac{F_п c}{3El^2} \times \left[\left(\frac{3}{2} l S_0 - S_в\right) a + S_a b\right], \quad (9\text{-}19)$$

где $S_0 = \Sigma \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$ (см. рис. 9-14 и табл. 9-3);

c — расстояние от точки приложения силы $F_п$ до ближайшей опоры, м.

При сочленении валов с помощью шкива или зубчатой шестерни точка приложения силы $F_п$ лежит в середине свободного конца вала (рис. 9-14). При сочленении валов эластичной муфтой сила приложения лежит посередине упругой части пальцев.

Прогиб вала вызывают также силы одностороннего магнитного притяжения, которые возникают, если ротор будет смещен из центрального положения по отношению расточки машины. Первоначальное смещение ротора происходит вследствие неточности обработки, износа подшипников и прогиба вала под действием сил $G_р$ и $F_п$. Первоначальное смещение ротора, м, принимают равным:

$$e_0 = 0{,}1\,\delta + f_G + f_п, \quad (9\text{-}20)$$

где δ — воздушный зазор, м.

Вследствие смещения ротора магнитные потоки полюсов будут неодинаковы. У полюсов, расположенных со стороны меньших воздушных зазоров, потоки больше. Соответственно больше и сила поперечного магнитного притяжения. Силу одностороннего магнитного притяжения, Н, вызванную смещением ротора на e_0, определяют по формуле

$$T_0 = 2{,}94 D_2 l_2 \frac{e_0}{\delta} 10^5, \quad (9\text{-}21)$$

где D_2 — диаметр ротора, м;

l_2 — длина ротора без радиальных каналов, м.

Сила T_0 вызывает дополнительный прогиб вала, который пропорционален прогибу f_G от веса ротора:

$$f_т = f_G T_0 / G_р. \quad (9\text{-}22)$$

Вследствие увеличения прогиба силы магнитного притяжения увеличатся, что вызовет дальнейшее увеличение прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся, при этом установившийся прогиб под действием сил магнитного притяжения будет равен:

$$f_м = \frac{f_т}{1 - m}, \quad (9\text{-}23)$$

где $m = f_т / e_0$.

Результирующий прогиб вала определяется для наихудшего случая, когда отдельные составляющие прогибов суммируются:

$$f = f_м + f_G + f_п. \quad (9\text{-}24)$$

Для надежной работы машины допустимый прогиб зависит от способа ее сочленения с исполнительным механизмом или двигателем.

При применении соединительной упругой муфты суммарный прогиб в процентах длины воздушного зазора должен составлять в асинхронных двигателях не более 10%, в синхронных машинах — не более 8% и в машинах постоянного тока — не более 6%. При сочленении посредством ременной передачи прогиб должен быть не более 10% воздушного зазора. При ограничении перекоса зубьев при зубчатой передаче прогиб не должен превышать 10% у асинхронных двигателей, 7% у синхронных машин и 5% у машин постоянного тока.

Критическая частота вращения. Для определения критической частоты вращения, об/мин, воспользуемся приближенной формулой, которая получена при учете одностороннего магнитного притяжения в предположении, что ротор представляет однородную систему:

$$n_к \approx 30 \sqrt{\frac{1-m}{f_G}}. \qquad (9\text{-}25)$$

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30%.

Расчет вала на прочность. Вал электрических машин передает вращающий момент и, кроме того, испытывает изгибающие усилия от сил тяжести, магнитного притяжения и от поперечных сил на свободном конце. В результате этого вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения.

При совместном действии изгиба и кручения по теории наибольших касательных напряжений приведенное к случаю изгиба напряжение, Па, определяется по формуле

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\sigma^2 + 4(\alpha\tau)^2}, \qquad (9\text{-}26)$$

где σ — напряжение изгиба, Па;
τ — напряжение кручения, Па;
α — отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Учитывая, что

$$\sigma = \frac{M_и}{0{,}1 d^3} \qquad (9\text{-}27)$$

и

$$\tau = \frac{kM_н}{0{,}2 d^3}, \qquad (9\text{-}28)$$

после подстановки получаем расчетную формулу

$$\sigma_{пр} = \frac{1}{W} \sqrt{M_и^2 + (k\alpha M_н)^2}, \qquad (9\text{-}29)$$

где W — момент сопротивления при изгибе, м³; для вала диаметром d

$$W = 0{,}1 d^3; \qquad (9\text{-}30)$$

$M_и$ — изгибающий момент в расчетном сечении, Н·м;
$M_н$ — номинальный вращающий момент, Н·м;
k — коэффициент перегрузки; его в среднем можно принять равным 2—2,5.

Коэффициент α принимают равным 0,6 для нереверсивных машин и 0,8 для реверсивных.

Расчет вала на прочность заключается в определении напряжений в сечении каждой его ступени. Для этого необходимо для каждой ступени определить изгибающий момент с учетом перегрузки и момент сопротивления при изгибе. На участках вала, ослабленных шпоночными канавками, момент сопротивления определяется по диаметру d_0 (см. рис. 9-14). Изгибающий момент, Н·м:

для участка вала c (рис. 9-14)

$$M_и = kF_п z_i; \qquad (9\text{-}31)$$

для участка b

$$M_и = kF_п c\left(1 - \frac{y_i}{l}\right) + (G_р + T)\frac{a y_i}{l}; \qquad (9\text{-}32)$$

для участка a

$$M_и = [kF_п c + (G_р + T)b]\frac{x_i}{l}. \qquad (9\text{-}33)$$

Нагрузка от установившегося магнитного притяжения, Н,

$$T = \frac{T_0}{1-m}. \qquad (9\text{-}34)$$

Расчетные значения $\sigma_{пр}$ сопоставляют с допускаемым для данного материала. Допускаемое значение напряжения не должно превышать величины 0,7 от предела текучести. Для стали марки 45 предел текучести 3600·10⁵ Па.

Пример расчета вала асинхронного двигателя, имеющего $M_н = 3190$ Н·м, $n_н = 585$ об/мин, массу ротора (включая среднюю часть вала) 753 кг, наружный диаметр сердечника ротора $D_2 = 55 \cdot 10^{-2}$ м, длину сердечника ротора без радиальных каналов $l_2 = 36{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, воздушный зазор $\delta = 0{,}08 \times 10^{-2}$ м. Сочленение двигателя с приводом — через эластичную муфту. Диаметр по центрам пальцев муфты $D_1 = 28{,}5 \cdot 10^{-2}$ м. Размеры вала приведены на рис. 9-15.

$$G_р = 9{,}81 \cdot 753 = 7400 \text{ Н};$$

по (9-17)

$$F_п = 0{,}3 \frac{3190}{0{,}5 \cdot 28{,}5 \cdot 10^{-2}} = 6700 \text{ Н}.$$

Прогиб вала посредине сердечника под действием силы тяжести ротора по (9-15)

$$f_G = \frac{7400}{3\cdot 2{,}06\cdot 10^{11}\cdot 92{,}2^2\cdot 10^{-4}}(48{,}23\cdot 10^2\times$$
$$\times 43{,}1^2\cdot 10^{-4} + 32{,}53\cdot 10^2\cdot 49{,}1\cdot 10^{-4}) =$$
$$= 0{,}0022\cdot 10^{-2}\ м.$$

$S_b = 48{,}23\cdot 10^2$ м$^{-1}$ и $S_a = 32{,}53\cdot 10^2$ м$^{-1}$

(взяты из табл. 9-3).

Прогиб вала посредине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты по (9-19)

$$f_n = \frac{6700\cdot 33{,}5\cdot 10^{-2}}{3\cdot 2{,}06\cdot 10^{11}\cdot 92{,}2^2\cdot 10^{-4}}\left[\left(\frac{3}{2}\cdot 92{,}2\times\right.\right.$$
$$\times 10^{-2}\cdot 1{,}01\cdot 10^4 - 48{,}23\cdot 10^2)\cdot 43{,}1\cdot 10^{-2} +$$
$$\left. + 32{,}53\cdot 10^2\cdot 49{,}1\cdot 10^{-2}\right] = 0{,}0022\cdot 10^{-2}\ м.$$

Первоначальное смещение ротора по (9-20)

$$e_0 = 0{,}1\cdot 0{,}08\cdot 10^{-2} + 0{,}0022\cdot 10^{-2} +$$
$$+ 0{,}0022\cdot 10^{-2} = 0{,}0124\cdot 10^{-2}\ м.$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения по (9-21)

$$T_0 = 2{,}94\cdot 55\cdot 10^{-2}\cdot 36{,}5\cdot 10^{-2}\frac{0{,}0124\cdot 10^{-2}}{0{,}08\cdot 10^{-2}}\times$$
$$\times 10^6 = 9200\ Н.$$

Прогиб от силы T_0 по (9-22)

$$f_т = 0{,}0022\cdot 10^{-2}\frac{9200}{7400} = 0{,}0027\cdot 10^{-2}\ м.$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения по (9-23)

$$f_м = \frac{0{,}0027\cdot 10^{-2}}{1 - 0{,}218} = 0{,}0035\cdot 10^{-2}\ м;$$
$$m = \frac{0{,}0027}{0{,}0124} = 0{,}218.$$

Суммарный прогиб посредине магнитопровода ротора

$$f = (0{,}0035 + 0{,}0022 + 0{,}0022)\cdot 10^{-2} =$$
$$= 0{,}0079\cdot 10^{-2}\ м,$$

т. е. составляет 9,92% от δ, что допустимо.

Критическая частота вращения по (9-25)

$$n_к = 30\sqrt{\frac{1 - 0{,}218}{0{,}0022\cdot 10^{-2}}} = 5650\ об/мин >$$
$$> 1{,}3n_н.$$

В расчете на прочность принимаем коэффициент перегрузки $k=2$.

Напряжение на свободном конце вала в сечении A (рис. 9-15):
по (9-31)

$$M_{иA} = 2\cdot 6700\cdot 23{,}5\cdot 10^{-2} = 3140\ Н\cdot м;$$

по (9-30)

$$W_A = 0{,}1\cdot 9{,}2^3\cdot 10^{-6} = 78\cdot 10^{-6}\ м^3;$$

по (9-29)

$$\sigma_{прA} = \frac{\sqrt{3140^2 + (2\cdot 0{,}6\cdot 3190)^2}}{78\cdot 10^{-6}} =$$
$$= 632\cdot 10^5\ Па.$$

Напряжение в сечении B:

$$M_{иB} = 2\cdot 6700\cdot 31\cdot 10^{-2} = 4150\ Н\cdot м;$$
$$W_B = 0{,}1\cdot 10{,}5^3\cdot 10^{-6} = 110\cdot 10^{-6}\ м^3;$$
$$\sigma_{прB} = \frac{\sqrt{4150^2 + (2\cdot 0{,}6\cdot 3190)^2}}{110\cdot 10^{-6}} =$$
$$= 490\cdot 10^5\ Па.$$

Напряжение в сечении C:
из (9-32) и (9-34)

$$M_{иC} = 2\cdot 6700\cdot 33{,}5\cdot 10^{-2}\left(1 - \frac{2{,}5\cdot 10^{-2}}{92{,}2\cdot 10^{-2}}\right) +$$
$$+ (7400 + 11\,700)\cdot 43{,}1\cdot 10^{-2}\frac{2{,}5\cdot 10^{-2}}{92{,}2\cdot 10^{-2}} =$$
$$= 4570\ Н\cdot м;$$

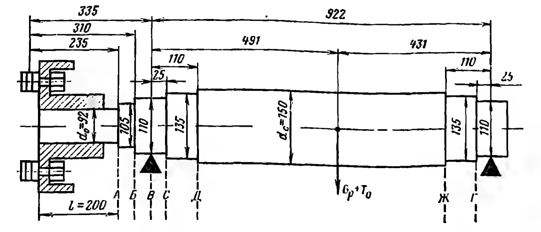


Рис. 9-15. Вал асинхронного двигателя.

Таблица 9-3

№ участка	d_i, м	J_i, м⁴	y_i, м	y_i^3, м³	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, м³	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, м⁻¹	y_i^2, м²	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, м²	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, м⁻²
Левая часть 1	$11 \cdot 10^{-2}$	$719 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$16 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$	$0,02 \cdot 10^{2}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$6,25 \cdot 10^{-4}$	$0,01 \cdot 10^{4}$
2	$13,5 \cdot 10^{-2}$	$1630 \cdot 10^{-8}$	$11 \cdot 10^{-2}$	$1330 \cdot 10^{-6}$	$1314 \cdot 10^{-6}$	$0,81 \cdot 10^{2}$	$121 \cdot 10^{-4}$	$115 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{4}$
3	$15 \cdot 10^{-2}$	$2480 \cdot 10^{-8}$	$40 \cdot 10^{-2}$	$118\,800 \cdot 10^{-6}$	$117\,470 \cdot 10^{-6}$	$47,4 \cdot 10^{2}$	$2410 \cdot 10^{-4}$	$2299 \cdot 10^{-4}$	$0,93 \cdot 10^{4}$

$$S_b = \Sigma \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = 48,23 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$$

$$S_0 = \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 1,01 \cdot 10^4 \text{ м}^2$$

№ участка	d_i, м	J_i, м⁴	x_i, м	x_i^3, м³	$x_i^3 - x_{i-1}^3$, м³	$\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}$, м⁻¹
Правая часть 1	$11 \cdot 10^{-2}$	$719 \cdot 10^{-8}$	2,5	$16 \cdot 10^{-6}$	$16 \cdot 10^{-6}$	$0,02 \cdot 10^{2}$
2	$13,5 \cdot 10^{-2}$	$1630 \cdot 10^{-8}$	11	$1330 \cdot 10^{-6}$	$1314 \cdot 10^{-6}$	$0,81 \cdot 10^{2}$
3	$15 \cdot 10^{-2}$	$2480 \cdot 10^{-8}$	43,1	$80\,000 \cdot 10^{-6}$	$78\,670 \cdot 10^{-6}$	$31,7 \cdot 10^{2}$

$$S_a = \Sigma \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = 32,53 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$$

$$T = \frac{9200}{1 - 0,218} = 11\,700 \text{ Н};$$

$$W_C = 0,1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 132 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

из (9-29)

$$\sigma_{\text{пр}C} = \frac{\sqrt{4570^2 + (0,6 \cdot 2 \cdot 3190)^2}}{132 \cdot 10^{-6}} = 450 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Напряжение в сечении $Д$:

$$M_{\text{и}Д} = 2 \cdot 6700 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} \left(1 - \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}}\right) + (7400 + 11\,700)\, 43,1 \cdot 10^{-2} \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 4840 \text{ Н·м};$$

$$W_Д = 0,1 \cdot 13,5^3 \cdot 10^{-6} = 245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Д} = \frac{\sqrt{4840^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{245 \cdot 10^{-6}} = 250 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Напряжение в сечении $Г$:

$$M_{\text{и}Г} = [2 \cdot 6700 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} + (7400 + 11\,700)\, 49,1 \cdot 10^{-2}] \frac{2,5 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 370 \text{ Н·м};$$

$$W_Г = 0,1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 132 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Г} = \frac{\sqrt{370^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{132 \cdot 10^{-6}} = 244 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Сечение $Ж$:

$$M_{\text{и}Ж} = [2 \cdot 6700 \cdot 33,5 \cdot 10^{-2} + (7400 + 11\,700)\, 49,1 \cdot 10^{-2}] \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92,2 \cdot 10^{-2}} = 1650 \text{ Н·м};$$

$$W_Ж = 0,1 \cdot 13,5^3 \cdot 10^{-6} = 245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{\text{пр}Ж} = \frac{\sqrt{1650^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 3190)^2}}{245 \cdot 10^{-6}} = 170 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Из сопоставления полученных данных следует, что наиболее нагруженным является сечение $А$, для которого

$$\sigma_{\text{пр}} = 632 \cdot 10^5 < 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

9-4. ПОДШИПНИКИ. ПОДШИПНИКОВЫЕ ЩИТЫ

В электрических машинах с горизонтальным валом подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают действия силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил, возникающих от несбалансированности ротора и дополнительных продольных нагрузок от приводных механизмов. В машинах относительно небольшой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах, которые располагаются по торцам машины и предназначаются для прикрытия лобовых частей обмоток.

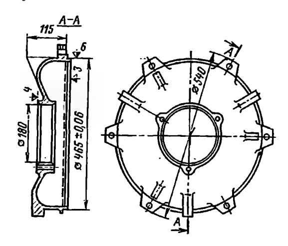


Рис. 9-16. Подшипниковый щит асинхронного двигателя.

Подшипниковые щиты выполняют сварными или литыми (рис. 9-16), в средней части щитов делают сквозное цилиндрическое отверстие для подшипников. Щиты приболчиваются к станине. Для центровки относительно станины в верхней торцевой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик подшипникового щита входит в расточку станины, то такое сочленение образует внутренний замок. При расположении буртика на наружной поверхности станины замок называется наружным.

В машинах защищенного исполнения в щитах делают окна для прохождения охлаждающего воздуха. Если подшипниковый щит охватывает коллектор или контактные кольца, то для доступа к щеткам в верхней его части делают проемы, закрываемые крышками. Для закрепления щита в станке при его обработке на нем делают специальные технологические приливы.

В машинах большой мощности при внешних диаметрах более 1 м

подшипники выносят за станину и устанавливают на специальных стояках (рис. 9-17). Стояковые подшипники крепят болтами к той же фундаментной плите, на которой установлена станина. Во избежание появления подшипниковых токов один из стояков изолируют от фундаментной плиты изоляционной прокладкой, при этом с помощью изоляционных трубок и шайб изолируют также крепящие болты и штифты.

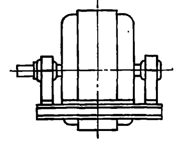


Рис. 9-17. Общий вид машины со стояковыми подшипниками.

Подшипниковые токи, которые замыкаются по контуру вал — стояк подшипника — фундаментная плита — стояк подшипника — вал, приводят к коррозии поверхности подшипников, шеек вала и вызывают старение масла. Причиной появления этих токов является ЭДС, наводимая в вале от сцепленного с ним изменяющегося во времени потока, вызванного магнитной несимметрией из-за наличия стыков между частями статора и сегментами, наличием шпоночных канавок, эксцентричного положения ротора и т. д. Появление подшипниковых токов наблюдается главным образом у машин относительно больших мощностей.

Подшипники по конструктивным признакам подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые подшипники) и подшипники скольжения. По роду воспринимаемой нагрузки различают опорные подшипники с радиальной нагрузкой и упорные подшипники с аксиальной нагрузкой, а по функциональным признакам — несущие и направляющие подшипники.

В машинах с горизонтальным расположением вала в основном применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники (рис. 9-18) могут кроме радиальной нагрузки воспринимать некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие больших осевых нагрузок. Поэтому в некоторых случаях (особенно в малых машинах) такие подшипники могут быть установлены в машинах с вертикальным расположением вала.

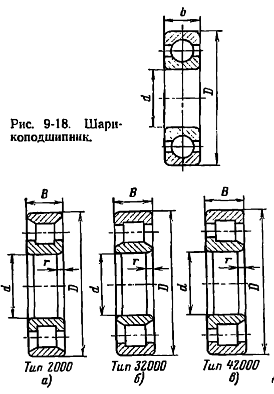


Рис. 9-18. Шарикоподшипник.

Рис. 9-19. Роликоподшипник.

Роликоподшипники (рис. 9-19) применяют для бо́льших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников.

Подшипники, показанные на рис. 9-19, *а* и *б*, могут воспринимать только радиальную нагрузку, а подшипник на рис. 9-19, *в* помимо радиальной нагрузки может воспринимать небольшую осевую нагрузку в одном направлении. В машинах небольшой мощности при $h \leqslant 200$ мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми.

У машин средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны — шариковым.

От осевого перемещения на посадочных местах под действием осевой нагрузки кольца подшипников удерживаются при помощи различных элементов — выступа и гайки или специальной упорной пластинки, закрепляющейся на болтах в торце вала, — или насаживаемым на вал кольцом. В машинах небольшой мощности обычно не делают фиксации внутреннего кольца шарикоподшипника на валу, а закрепляют лишь наружное его кольцо подшипниковой крышкой, являющейся одновременно деталью, удерживающей смазку подшипника. Если в машине применяются оба шариковых подшипника, то для возможности перемещения подшипника в осевом направлении при расширении вала у одного из них, а иногда и у обоих следует предусмотреть зазоры между крышками и наружным кольцом (рис. 9-20).

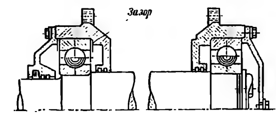


Рис. 9-20. Подшипниковые узлы с шарикоподшипниками.

Подшипники катящегося трения смазываются преимущественно консистентными смазками. Смазка служит для обеспечения коррозийной стойкости подшипников, распределения и отвода тепла, снижения потерь энергии за счет предотвращения сухого трения, уменьшения шума, защиты от попадания грязи. Рабочее пространство подшипникового узла заполняется смазкой не более чем на 2/3 объема. Выбор консистентной смазки производится на основании данных

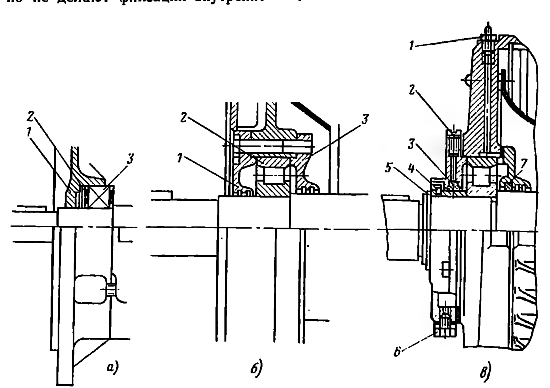


Рис. 9-21. Подшипниковые узлы асинхронных двигателей серии 4А.

а — двигателя 4А112 с герметизированными подшипниками (*1* — подшипниковый щит; *2* — пружинное кольцо; *3* — герметизированный подшипник); *б* — двигателя 4А118О, смазка которого пополняется при разборке (*1* — наружная крышка подшипника; *2* — подшипник; *3* — внутренняя крышка подшипника); *в* — двигателя 4А200 с устройством для пополнения смазки (*1* — масленка; *2* — пробка; *3* — войлочное уплотнение наружной крышки подшипника; *4* — кольцо уплотнения; *5* — стопорное кольцо; *6* — пробка спускного канала; *7* — войлочное уплотнение внутренней крышки подшипника).

об условиях работы подшипников.

Для нормальной работы подшипников необходимо предусмотреть уплотнения подшипниковых узлов, защищающих их от пыли, грязи, а также препятствующих вытеканию смазки в полость машины. Применяются различные конструкции уплотнений: фетровые, кольцевые зазоры, манжетные, лабиринтные и др. На рис. 9-21 показаны некоторые конструкции.

При больших частотах вращения (когда $dn > 300$, где n — частота вращения, об/мин, d — диаметр вала, м) для смазки подшипников применяют минеральные масла.

При проектировании машины перед конструктором ставится задача выбора по каталогу типа подшипника, соответствующего нагрузке и условиям их работы.

Для подбора конструкции, типа и размера подшипника необходимо знать: 1) значение и направление действующих на подшипник нагрузок; 2) характер нагрузки (спокойная, ударная, переменная); 3) диаметр цапфы, на которую сажается подшипник; 4) частоту вращения машины в минуту; 5) желательный срок службы подшипника.

В общем случае на подшипник действует радиальная и осевая нагрузки. Выбор подшипника производится по приведенной динамической нагрузке Q. Для однорядных радиальных шарикоподшипников эта нагрузка, Н, определяется по формулам

$$Q = K_н R \text{ при } A/R \leqslant e; \quad (9\text{-}35а)$$

$$Q = K_н (0{,}56 R + YA) \text{ при } A/R > e. \quad (9\text{-}35б)$$

Приведенная динамическая нагрузка для радиальных роликоподшипников с короткими цилиндрическими роликами находится по (9-35а). В формулах (9-35) приняты следующие обозначения: A, R — осевая и радиальная нагрузки на подшипник, Н; $K_н$ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя: при постоянной спокойной нагрузке $K_н = 1$, при нагрузке с умеренными толчками $K_н = 1{,}5$, при нагрузке со значительными толчками $K_н = 2$, при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками $K_н = 3$; для общепромышленных машин в большинстве случаев можно принять $K_н = 1{,}5 \div 2$; Y — коэффициент приведения осевой нагрузки к радиальной. Значения Y и e для однорядных радиальных шарикоподшипников в зависимости от отношения A/C_0 (C_0 — статическая грузоподъемность, Н, см. приложение V), определяют по табл. 9-4.

Таблица 9-4

A/C_0	e	Y
0,014	0,19	2,3
0,028	0,22	1,99
0,056	0,26	1,71
0,084	0,28	1,55
0,11	0,3	1,45
0,17	0,34	1,31
0,28	0,38	1,15
0,42	0,42	1,04
0,56	0,44	1

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию. Для электрических машин с горизонтальным расположением вала в большинстве случаев можно не учитывать осевую нагрузку ($A \approx 0$). При вертикальном расположении вала осевая нагрузка равна, Н:

$$A = G_р + G_{шк} + 0{,}1 R,$$

где $G_р$, $G_{шк}$ — силы тяжести ротора (или якоря с коллектором) и шкива (или полумуфты); $0{,}1R$ — осевое магнитное притяжение.

При определении радиальной нагрузки на подшипники R_A и R_B исходят из наихудшего случая. Для нахождения R_B при односторонней передаче предполагается, что сила $F_п$ направлена вниз, а для R_A — вверх, тогда (рис. 9-22)

$$R_B = F_п \frac{l + c}{l} + (G_р + T_0) \frac{a}{l}; \quad (9\text{-}36)$$

$$R_A = F_п \frac{c}{l} + (G_р + T_0) \frac{b}{l}, \quad (9\text{-}37)$$

где $F_п$ определяется для работы ма-

шины в номинальном режиме, Н;

$G_р$ — сила тяжести ротора, Н;

T_0 — сила одностороннего магнитного притяжения, Н (см. § 9-3).

Определив приведенную нагрузку Q, а также учитывая частоту вращения подшипника n и требуемый срок службы в часах $L_д$, находят динамическую грузоподъемность С, Н, которая является ос-

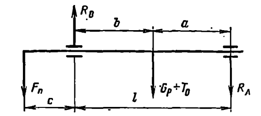


Рис. 9-22. К определению радиальных реакций подшипников R_A и R_B.

новной характеристикой подшипника:

для шарикоподшипников

$$C = \frac{Q}{25,6}\sqrt[3]{L_д n}; \qquad (9\text{-}38)$$

для роликоподшипников

$$C = \frac{Q}{18,5}(L_д n)^{0,3}. \qquad (9\text{-}38а)$$

Срок службы (или долговечность) подшипника в часах может быть задан или его выбирают равным $L_д \geqslant (15 \div 20) \cdot 10^3$ ч.

По найденной динамической грузоподъемности по таблицам ГОСТ (см. табл. П-36 и П-37) выбирают конкретный подшипник и находят его габаритные размеры. Диаметр внутреннего кольца у выбранного подшипника должен быть равен диаметру цапфы. Наряду с динамической грузоподъемностью в таблицах приведены данные о предельной частоте вращения. Расчетное значение C должно быть меньшим или равным табличному значению. Если расчетное значение C получается больше табличного, а долговечность не может быть уменьшена, то следует выбрать подшипник из другой, соответствующей заданным параметрам серии. В некоторых случаях можно пойти на установку сдвоенных подшипников. При применении сдвоенных подшипников, учитывая неравномерность распределения между ними нагрузки, каждый подшипник следует рассчитывать на нагрузку, равную 70% всей нагрузки опоры. Подбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

Подшипники скольжения. В настоящее время подшипники скольжения применяются главным образом для крупных электрических машин и выполняются в виде стояковых подшипников (рис. 9-23). Корпус подшипника изготовляется из чугуна. В корпус входят стояк *1* и верхняя крышка *2*. Основными элементами подшипника являются вкладыш *3* — втулка, разрезанная по образующей на две половинки. В его верхней половине делаются одно или два отверстия для смазочных колец *4*. Вкладыши выполняются из стали, чугуна, бронзы и

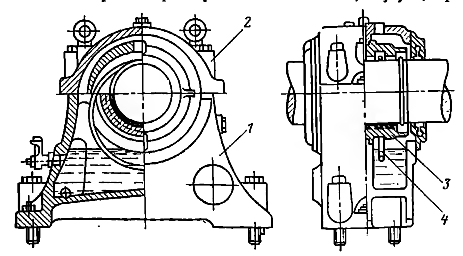


Рис. 9-23. Стояковый подшипник с кольцевой смазкой.

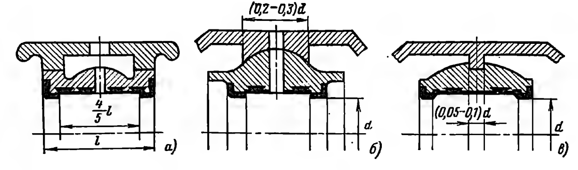


Рис. 9-24. Посадки вкладышей в корпусе подшипника.

а — жесткая; *б* — сферическая; *в* — узкоцилиндрическая.

других материалов. Толщина вкладышей берется равной $s=(0{,}05d+5\ мм)\div(0{,}1d+0{,}5\ мм)$, где d — диаметр цапфы. Внутренняя поверхность вкладыша, охватывающая цапфу вала, заливается антифрикционным белым сплавом — баббитом. Для улучшения связи между баббитом и вкладышем последний имеет кольцевые канавки в виде ласточкина хвоста. Толщина слоя заливки в зависимости от диаметра вкладыша равна 2—8 мм. Посадка вкладышей в корпус подшипников выполняется жесткой или самоустанавливающейся (рис. 9-24). При жесткой посадке вкладыш фиксируется в гнезде, при самоустанавливающейся он опирается на шаровые опоры и может занимать положение в своих гнездах соответственно прогибу или перекосу вала. Для смазки трущихся поверхностей применяют масло. Способ подачи смазки выбирают в зависимости от условий работы машины. Наиболее распространенным способом смазки является кольцевая. Для этого на цапфу надевают металлическое кольцо большего диаметра. Кольцо свободно висит на цапфе, погружаясь в масляный резервуар подшипника. При вращении цапфы кольцо также начинает вращаться и, проходя через масляный резервуар, подает масло на верхнюю часть цапфы, где оно растекается по всей поверхности. Для контроля уровня масла в ванне подшипника имеется маслоуказатель, который снабжают смотровым стеклом. Кольцевая смазка применяется при окружных скоростях цапф $v_ц=2\div10$ м/с. При скоростях $v_ц>10$ м/с применяют принудительную смазку. В этом случае в пространство между трущимися поверхностями подается извне под давлением масло, которое затем стекает в масляную ванну и по спускной трубе идет в холодильник, а затем снова к насосу. При такой смазке в подшипник поступает такое количество масла, которое необходимо для смазки и охлаждения подшипника. Масло подают под давлением $(0{,}25-1)\times10^5$ Па. Находит применение также комбинированная система смазки, когда при принудительной смазке ставятся маслоподающие кольца.

Для предотвращения попадания масла в машину и вытекания его из подшипника в месте выхода вала из стояка ставят лабиринтные уплотнения и маслоулавливающие кольца.

Отдельные элементы подшипников скольжения стандартизированы.

Выбор подшипника скольжения производят по табл. 9-5, исходя из нагрузки на подшипник, которую определяют по формулам (9-36) или (9-37). Указанные в таблице размеры вкладыша подшипника означают его внутренний диаметр и длину. В таблице приведена ступенчатая линия, которая разграничивает подшипники с кольцевой смазкой (выше линии) и подшипники, требующие принудительной смазки.

Пример расчета. Подшипники качения для асинхронного двигателя с $n_н=585$ об/мин (см. пример расчета в § 9-3). $G_р=7400$ Н, $T_0=9200$ Н, $F_п=6700$ Н, $b=$

Таблица 9-5

Допускаемые нагрузки на подшипники с кольцевой смазкой, кН

Размеры, мм	Частота вращения, об/мин													
	125	150	167	187	214	250	300	375	428	500	600	750	1000	1500
100×130									9,0	10,0	11,0	12,0	14,0	16,0
110×130								10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	16,0	19,0
120×140								12,5	13,5	14,5	15,5	17,0	20,0	24,0
130×140							12,0	14,0	15,0	16,0	17,5	19,0	22,5	26,0
140×150							14,5	16,5	17,5	18,5	20,5	22,5	26,0	30,0
150×150							16,0	18,0	19,0	20,5	22,5	24,0	28,0	32,5
160×160							18,5	20,5	22,0	23,5	25,5	28,0	32,0	
180×180						22,0	24,5	27,0	29,0	31,0	33,5	37,0	42,0	
200×200					26,5	29,0	31,5	34,5	36,5	39,0	42,0	47,0	53,0	
220×220				31,5	33,5	36,5	39,5	43,0	46,0	48,5	54,0	59,0	66,0	
250×250			42,5	44,0	46,5	49,5	53,5	58.0	61,0	66,0	72.0	79,0		
280×280		53,5	55,5	58,0	61,0	66 0	71,5	77,5	82,0	87,5	94,0	104		
300×300		63,0	66,0	69,0	73,0	78.0	84,5	91,0	97,0	103	111	122,5		
350×350	85,0	91,0	95,5	100	105	114	122	134	140	150	160			
400×400	115	125	130	136	144	155	166	182	190	208	224			
450×450	155	165	173	180	190	205	220	241	256	273				
500×500	200	205	223	232	246	265	290	320	340					

$=49{,}1\cdot10^{-2}$ м, $a=43{,}1\cdot10^{-2}$ м, $c=33{,}5\times\times10^{-2}$ м, $l=92{,}2\cdot10^{-2}$ м. Диаметр цапфы $11\cdot10^{-2}$ м.

Из (9-37)

$$R_A=6700\frac{33{,}5}{92{,}2}+(7400+9200)\times\times\frac{49{,}1}{92{,}2}=10\,590\ \text{Н};$$

из (9-35а)

$$Q_A=1{,}5\cdot10\,590=15\,850\ \text{Н};$$

из (9-38)

$$C=\frac{15\,850}{25{,}6}\sqrt[3]{15\,000\cdot585}=128\,000\ \text{Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем шарикоподшипник средней серии 322 ($C=158\,000$ Н).

Аналогично

$$R_B=6700\,\frac{33{,}5+92{,}2}{92{,}2}+(7400+9200)\times\times\frac{43{,}1}{92{,}2}=16\,950\ \text{Н};$$

$$Q_B=1{,}5\cdot16\,950=25\,400\ \text{Н};$$

$$C=\frac{25\,400}{18{,}5}\,(15\,000\cdot585)^{0,3}=166\,200\ \text{Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем радиальный роликоподшипник легкой узкой серии 32222 ($C=185\,000$ Н).

9-5. ПОЛЮСЫ

На полюсах электрических машин располагается обмотка возбуждения. Полюсы создают магнитный поток, обеспечивая нужный характер его распределения в воздушном зазоре машины. Как правило, полюсы машин постоянного тока размещают на статоре, а у синхронных машин — на роторе. В машинах постоянного тока помимо главных полюсов на статоре размещают добавочные, предназначенные для улучшения коммутации.

Главные полюсы машин постоянного тока (рис. 9-25) собираются из отдельных листов, которые штампуются из электротехнической стали толщиной 1 мм. Собранные в пакет, они спрессовываются при давлении (20—25)$\cdot10^5$ Па и скрепляются заклепками. Крайние листы пакета делают более толстыми. В зависимости от размера полюса они штампуются из листовой стали толщиной 4—10 мм. Эти листы по размеру делают несколько меньшими, чем остальные.

Заклепки вставляются в предусмотренные в листах отверстия,

а затем развальцовываются в конических углублениях листов (рис. 9-25). Они равномерно распределены по поверхности листов и занимают около 0,02—0,03 этой поверхности. Обычно их не менее четырех. Диаметры отверстий под заклепки берутся на 0,15—0,2 мм больше диаметра самой заклепки. Для полюсов применяются заклепки диаметром 6, 8, 10 и 12 мм.

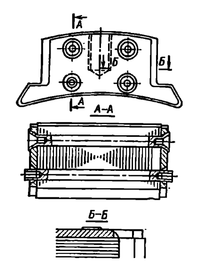


Рис. 9-25. Главный полюс машины постоянного тока.

Полюсы прикрепляются к станине болтами. Для этого в теле шихтованного полюса высверливаются отверстия и нарезается резьба (рис. 9-26, *а*). Резьба в шихтованном теле полюса механически ненадежна и не всегда обеспечивает плотное прилегание полюса к станине. Поэтому в более крупных машинах, а также у машин, работающих в условиях тряски, болты вворачиваются в стержни, вставляемые в тело полюса (рис. 9-26, *б*).

В крупных машинах постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки (рис. 9-26, *б*).

Добавочные полюсы выполняются цельными или собранными из штампованных стальных листов. В машинах относительно небольшой мощности добавочные полюсы

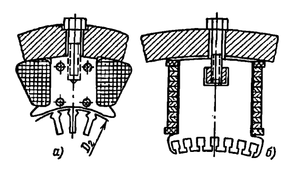
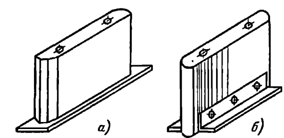
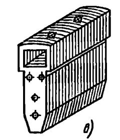


Рис. 9-26. Крепление главного полюса к станине.

выполняются в виде стальных отливок или из полос проката. В более крупных машинах они собираются из листовой стали толщиной 1 мм. На рис. 9-27 даны различные исполнения добавочных полюсов. Сердечник полюса и его наконечник (рис. 9-27, *а*) выполняются из одной заготовки путем ее последующей обработки, а при литых полюсах — путем формовки. Полочки (рис. 9-27, *б* и *г*), служащие для поддержания катушек, выполняются из немагнитных материалов и прикрепляются заклепками к телу полюса. В машинах относительно большой мощности полюсы выполняются Т-образной формы (рис. 9-27, *в*). При таком их выполнении увеличивается поверхность прилегания полюса к станине и уменьшается индукция в стыке. Полюсы, собранные из отдельных листов, имеют преимущество перед массивными, так как в них уменьшается





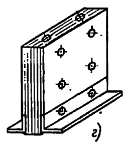


Рис. 9-27. Добавочные полюсы машины постоянного тока.

замедляющее действие вихревых токов при переходных процессах, что способствует улучшению коммутации.

При механическом расчете полюсов проверяется их крепление к станине и проводится расчет заклепок.

Расчет крепления главных полюсов в машинах постоянного тока проводится из условия, что на болты, которыми полюс соединяется со станиной, действует тангенциальная сила Q от вращающего момента, а на полюсы, расположенные по горизонтальному диаметру ярма, еще и сила тяжести полюса с обмоткой $G_{п,о}$ (рис. 9-28). Магнитное притяжение полюса якорем в этих расчетах не учитывается, так как он одновременно притягивается и станиной, причем с большей силой вследствие более высокого значения индукции в сердечнике полюса.

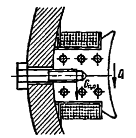


Рис. 9-28. К расчету крепления главного полюса.

Тангенциальная сила, действующая на полюс, Н,

$$Q = \frac{kM_н}{pD_2}, \qquad (9\text{-}39)$$

где k — коэффициент перегрузки ($k=2\div3$);
p — число пар полюсов;
D_2 — диаметр якоря, м;
$M_н$ — номинальный момент, Н·м:

$$M_н = 9550\frac{P_н}{n_н}.$$

Сила тяжести полюса с обмоткой, Н,

$$G_{п,о} = 9{,}81 m_{п,о},$$

где $m_{п,о}$ — масса полюса с обмоткой, кг.

Принимая коэффициент трения между станиной и полюсом равным 0,2, определяют необходимую площадь сечения болтов полюса по внутреннему диаметру резьбы, м²:

$$S_б = \frac{Q + G_{п,о}}{0{,}2\sigma}, \qquad (9\text{-}40)$$

где σ — допустимое напряжение растяжения в болтах: для стали Ст3 с некоторым запасом $\sigma=60$ МПа.

Размер, м, болта по внутреннему диаметру резьбы при числе болтов на полюс $m_б$ ($m_б \geqslant 2$)

$$d_{01} = \sqrt{\frac{4S_б}{\pi m_б}}. \qquad (9\text{-}41)$$

Заклепки полюсов проверяются на растяжение

$$\sigma = \frac{4qS_п}{\pi d_з^2 m_з} \leqslant 600\cdot10^5 \text{ Па}, \quad (9\text{-}42)$$

где q — давление спрессованных листов полюса: $q=(20\div25)\cdot10^5$ Па;
$S_п$ — площадь вырубки листа полюса, м²;
$m_з$ и $d_з$ — число и диаметр, м, заклепок ($m_з \geqslant 4$).

Расчет крепления добавочных полюсов производится, исходя из того, что на болты, притягивающие их к станине, действует усилие магнитного притяжения к соседним разноименным главным полюсам. В передаче вращающего момента добавочные полюсы не участвуют. Учитывая, что основание добавочного полюса значительно уже, чем у главного, необходимо проверить полюс не только на сдвиг, но и на опрокидывание.

Силы взаимодействия между дополнительным полюсом и главными полюсами, расположенными по обе стороны от него, различны по значению и направлению. Результирующая сила взаимодействия между концами добавочного полюса и полюсным наконечником соседнего главного полюса равна, Н:

$$Q_1 = hl_д\frac{(F_ш + kF_c)kF_д}{4{,}08\cdot10^5\, l_1^2}. \quad (9\text{-}43)$$

Результирующая сила взаимодействия между сердечником добавочного полюса и сердечниками соседних главных полюсов, Н,

$$Q_2 = (H - h)\, l_д\frac{(F_ш + kF_c)kF_д}{18{,}3\cdot10^5\, l_2^2}. \quad (9\text{-}44)$$

В приведенных формулах обозначения величин соответствуют обозначениям на рис. 9-29, $l_д$ — осевая длина дополнительного полюса. Магнитодвижущие силы параллельной обмотки возбуждения $F_ш$, последовательной обмотки $F_с$ и дополнительных полюсов $F_д$ берутся для номинального режима из электро-

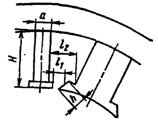


Рис. 9-29. К расчету крепления добавочного полюса.

магнитного расчета; k — коэффициент перегрузки.

Полюс, расположенный по горизонтальному диаметру ярма, находится в наихудших условиях, поскольку действующие силы тяжести и магнитного тяжения суммируются. Для этого полюса расчетная сила затяга болтов, при которой сила трения между станиной и полюсом обеспечивает отсутствие сдвига полюса, равна, Н:

$$P' = \frac{Q_1 + Q_2 + G_{д.п}}{0,2}, \qquad (9\text{-}45)$$

где $G_{д.п}$ — сила тяжести добавочного полюса с обмоткой, Н;

0,2 — коэффициент трения между станиной и полюсом.

Расчетная сила затяга болтов, которая обеспечивает отсутствие опрокидывания полюса,

$$P'' = \frac{H}{0,5a}(0,9Q_1 + 0,7Q_2 + 0,5G_{д.п}). \qquad (9\text{-}46)$$

Расчет болтов ведется по наибольшей силе затяга P' или P''.

Внутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_{02} = \sqrt{\frac{4P}{\pi m_д \sigma}}, \qquad (9\text{-}47)$$

где $m_д$ — число болтов: $m_д \geqslant 2$.

В целях унификации болты для крепления главных и добавочных полюсов при небольшой разнице в их диаметрах берут одинаковыми.

Пример расчета. Исходные данные:

$P_н = 150$ кВт, $n_н = 1450$ об/мин, $D_2 = 36,8 \cdot 10^{-2}$ м, $l = l_д = 25,5 \cdot 10^{-2}$ м, $F_д = 6000$ А, $F_с = 2000$ А, $F_ш = 7400$ А, $m_{д.п} = 22$ кг, $m_{п.о} = 48$ кг, $l_1 = 4,5 \times 10^{-2}$ м; $l_2 = 7,5 \cdot 10^{-2}$ м; $H = 13 \cdot 10^{-2}$ м, $h = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $a = 4 \cdot 10^{-2}$ м, $S_п = 182 \times 10^{-4}$ м², $m_з = 6$, $d_з = 1,2 \cdot 10^{-2}$ м, $k = 2$, $m_б = 2$, $m_д = 2$.

Расчет болтов главного полюса: номинальный момент

$$M_н = 9550 \frac{150}{1450} = 990 \text{ Н·м};$$

тангенциальная сила по (9-39)

$$Q = \frac{2 \cdot 990}{2 \cdot 36,8 \cdot 10^{-2}} = 2700 \text{ Н};$$

сила тяжести полюса с обмоткой

$$G_{п.о} = 9,81 \cdot 48 = 470 \text{ Н};$$

из (9-40)

$$S_б = \frac{2700 + 470}{0,2 \cdot 600 \cdot 10^6} = 26,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2;$$

внутренний диаметр болта

$$d_{01} = \sqrt{\frac{4 \cdot 26,5 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 2}} = 1,3 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 13 \text{ мм}.$$

Выбираем болт М16 ($d_{01} = 13,835$ мм).

Проверка заклепок главных полюсов из (9-42)

$$\sigma = \frac{4 \cdot 20 \cdot 10^6 \cdot 182 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 1,2^2 \cdot 10^{-4} \cdot 6} = 535 \cdot 10^5 < 600 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Расчет болтов добавочного полюса: из (9-43)

$$Q_1 = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 25,5 \cdot 10^{-2} \times \frac{(7400 + 2 \cdot 2000) \cdot 2 \cdot 6000}{4,08 \cdot 10^6 (4,5 \cdot 10^{-2})^2} = 850 \text{ Н};$$

из (9-44)

$$Q_2 = (13 - 2)\, 10^{-2} \cdot 25,5 \cdot 10^{-2} \times \frac{(7400 + 2 \cdot 2000) \cdot 2 \cdot 6000}{18,3 \cdot 10^6 (7,5 \cdot 10^{-2})^2} = 373 \text{ Н};$$

сила тяжести дополнительного полюса с обмоткой

$$G_{д.п} = 9,81 \cdot 22 = 216 \text{ Н};$$

из (9-45)

$$P' = \frac{850 + 373 + 216}{0,2} = 7100 \text{ Н};$$

из (9-46)

$$P'' = \frac{13\cdot 10^{-2}}{0,5\cdot 4\cdot 10^{-2}}(0,9\cdot 850 + 0,7\cdot 373 + $$
$$+ 0,5\cdot 216) = 7320 \text{ Н};$$

внутренний диаметр резьбы болта

$$d_{02} = \sqrt{\frac{4\cdot 7320}{\pi\cdot 2\cdot 600\cdot 10^5}} = 0,89\cdot 10^{-2} \text{ м} = $$
$$= 8,9 \text{ мм};$$

можно выбрать болт М12 (d_{02}=10,106 мм); для крепления главных и добавочных полюсов целесообразно выбирать одинаковые болты М16.

Полюсы синхронных машин чаще всего выполняются шихтованными. Листы для полюсов штампуются из электротехнической стали толщиной 0,5—1 мм для машин небольшой мощности (до 100 кВт) и из стали Ст3 толщиной 1—2 мм для более мощных машин.

Листы собираются в пакет, по краям которого укладываются концевые щеки. В зависимости от ширины полюса щеки могут иметь различную форму (рис. 9-30). Пакет стягивается шпильками, пропущенными через отверстия, предусмотренные в листах сердечника. Гайки утапливаются в тело щек. Количество стяжных шпилек берется не менее четырех. Диаметр шпилек и их число определяются по (9-42) и выбираются таким образом, чтобы напряжение в них не превышало 60 МПа, а усилие, стягивающее сердечник, вызывало давление между листами около 2 МПа.

В машинах небольшой мощности полюсы болтами прикрепляются к валу или к напрессованной на него втулке (рис. 9-31).

Крепление полюсов в синхронных машинах мощностью свыше 100 кВт зависит от размеров ротора и частоты его вращения.

В тихоходных машинах полюсы к ободу магнитного колеса прикрепляются с помощью болтов, которые вворачиваются в стержни, вставленные в тело полюса (рис. 9-32, *а*). В быстроходных машинах полюсы прикрепляются к остову ротора с

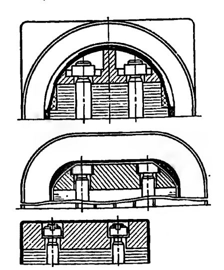


Рис. 9-30. Концевые щеки полюсов синхронных машин.

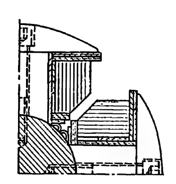


Рис. 9-31. Крепление полюсов синхронных машин небольшой мощности.

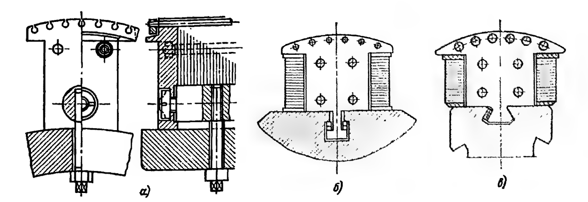


Рис. 9-32. Крепление полюсов синхронной машины большой мощности.

Таблица 9-6

№ хвоста	Размеры выступа, мм						Размеры паза, мм				Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
	a	b	c	e	k	r	g	m	h	n		Хвост не проварен	Хвост проварен
1	12	24	24	12	—	1	14	26	25	12	0,5 1	440 590	590 980
2	20	40	38	20	—	1,5	22	42	40	20	1 1,5	790 1470	1080 1960
3	26	52	50	25	80	1,5	29	55	52	25	1 1,5	690 2060	1080 2750
4	32	65	58	32	98	1,5	35	69	60	32	1 1,5	610 2160	1280 2850
5	38	70	58	32	110	1,5	42	74	60	32	1 1,5	520 2450	1170 3340

помощью хвостов Т-образной формы (рис. 9-32, *б*), а в некоторых случаях в форме ласточкина хвоста (рис. 9-32, *в*). Т-образные хвосты более технологичны, поэтому имеют преимущественное применение, за исключением машин с небольшим диаметром ротора. Размеры Т-образных хвостов и пазов для них нормализованы. В табл. 9-6 в соответствии с рис. 9-33 приведены размеры хвостов и нагрузки на них в зависимости от толщины листов. Хвосты в пазах расклиниваются клиньями из шпоночной стали с уклоном 1 : 100. При необходимости полюс может быть выполнен с двумя хвостами, расстояние между которыми обозначено в таблице буквой *k*. При больших нагрузках тонкие листы шихтованного магнитопровода теряют устойчивость и коробятся. Для увеличения механической устойчивости хвоста его кромки иногда провариваются по

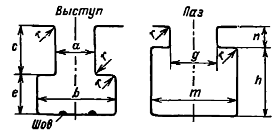


Рис. 9-33. Размеры паза и хвоста Т-образной формы.

специально выштампованным лункам.

Расчет крепления полюсов Т-образными хвостами в синхронных машинах производится путем сопоставления нагрузки на хвост с допустимой нагрузкой по табл. 9-6. Нагрузка на хвост обусловлена центробежной силой, которая определяется на единицу длины при максимальной частоте вращения.

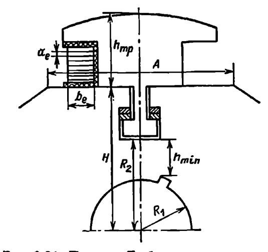


Рис. 9-34. Полюс с Т-образным хвостом.

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины полюса, Н/м,

$$C' = 11{,}0\left(m'_m + m'_{к.в}\right) R \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \qquad (9\text{-}48)$$

где R — средний радиус центра

тяжести полюса (рис. 9-34), м:

$$R = H + 0{,}5h_{\text{тр}}, \qquad (9\text{-}49)$$

m'_m, $m'_{\text{к,в}}$ — массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м;

n_{max} — максимальная частота вращения: для синхронных машин общепромышленного применения $n_{max} = 1{,}2n_{\text{н}}$.

Масса катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м,

$$m'_{\text{к,в}} = 2a_e b_c w_e \cdot 8900 \cdot 1{,}05 =$$

$$= 1{,}87 \cdot 10^4 a_e b_e w_e, \qquad (9\text{-}50)$$

где $a_e b_e$ — поперечное сечение проводника обмотки возбуждения, м²;

w_e — число витков в катушке.

Коэффициент 1,05 учитывает изоляцию проводника. Масса полюса на 1 м длины, кг/м,

$$m'_m = 7800 S_m, \qquad (9\text{-}51)$$

где S_m — площадь поперечного сечения полюса с полюсным наконечником и хвостами, м²; для предварительных расчетов площадь хвостов можно принимать равной 7% площади сердечника.

По найденной из (9-48) силе C' по табл. 9-6 выбирается тип хвоста.

В том случае, если полученная из расчета нагрузка на хвост превышает допустимую, то полюс можно выполнять с двумя или бо́льшим числом хвостов. Учитывая возможную неравномерность распределения усилий между хвостами, нагрузка на каждый из них по сравнению с табличной снижается на 10% при двух хвостах и на 20% — при трех.

Пример расчета. Исходные данные: $n_{\text{н}} = 600$ об/мин, $H = 41{,}9 \cdot 10^{-2}$ м, $h_{\text{тр}} = 21{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $S_m = 484 \cdot 10^{-4}$ м², $a_e = 0{,}28 \times 10^{-2}$ м, $b_e = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $w_e = 46$, толщина листа 1,5 мм.

Из (9-50)

$$m'_{\text{к,в}} = 1{,}87 \cdot 10^4 \cdot 0{,}28 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 46 =$$

$$= 72{,}3 \text{ кг/м};$$

из (9-51)

$$m'_m = 7800 \cdot 484 \cdot 10^{-4} = 378 \text{ кг/м};$$

из (9-49)

$$R = \left(41{,}9 + \frac{1}{2}\,21{,}5\right) \cdot 10^{-2} = 52{,}65 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

из (9-48)

$$C' = 11{,}0\,(378 + 72{,}3) \cdot 52{,}65 \cdot 10^{-2} \times$$

$$\times \left(\frac{1{,}2 \cdot 600}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 1350 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

По табл. 9-6 для этой машины может быть выбран хвост № 2 без проварки основания.

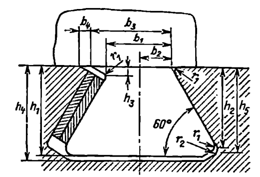


Рис. 9-35. Размеры паза и ласточкина хвоста.

Расчет крепления полюсов с помощью ласточкиных хвостов. Закрепление полюсов в ободе ротора с помощью выступов в виде ласточкина хвоста (см. рис. 9-32, *в*) применяют в машинах средней мощности, когда радиальная высота обода ротора может оказаться недостаточной для размещения паза Т-образной формы. Заклинивание хвостов производят двумя затяжными клиньями с уклоном 1 : 200, расположенными с боковой стороны хвоста.

В табл. 9-7 даны размеры нормализованных ласточкиных хвостов и пазов для них (обозначения см. на рис. 9-35).

Выбор хвоста производится так же, как и в предыдущем случае, исходя из рассчитанной по (9-48) нагрузки.

Расчет крепления полюса при помощи болтов. Число болтов для крепления полюса $m_б$ выбирается не менее двух. Для того чтобы не происходило удлинение болтов под действием центробежной силы при вращении ротора, болты ставят с предварительным натягом, который превышает центробежную силу на 20%.

Таблица 9-7

№ хвоста	Размеры хвоста, мм						Размеры паза, мм					Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
	b_1	b_2	h_1	h_2	h_3	r_1	b_3	b_4	h_4	h_3	r_2		Хвост не проварен	Хвост проварен
1	14	4,4	21	16,5	4,5	1,5	19,2	6,5	22	17,5	1,5	1 1,5	295 785	440 980
2	18	6,4	25	20,5	4,5	1,5	23,2	6,5	26,5	22	1,5	1 1,5	390 980	590 1280
3	22	8,4	29	24,5	4,5	2	27,2	6,5	30,5	26	2	1 1,5	490 1180	735 1570
4	27	10,9	34	29,5	4,5	2,5	32,2	6,5	36	31,5	2,5	1,5	1370	1870
5	33	13,9	41	36,5	4,5	3	38,2	6,5	43,5	39	3	1,5	1770	2350
6	40	17,4	49	44,5	4,5	4	45,2	6,5	51,5	47	4	1,5	2160	2850

Центробежная сила полюса при максимальной скорости, Н,

$$C_1 = 11{,}0\cdot 10^3 m_п R\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2, \quad (9\text{-}52)$$

где $m_п$ — масса одного полюса, равная сумме масс сердечника, обмотки возбуждения и демпферной (пусковой) обмотки (берется из электромагнитного расчета);

R — по (9-49), м.

Виутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_0 = \sqrt{\frac{1{,}2\cdot 4C_1}{\pi m_б\, \sigma_{доп}}}. \quad (9\text{-}53)$$

Допустимое напряжение $\sigma_{доп}$ для болтов из стали Ст5 и марки 30 составляет 120 МПа.

Пример расчета. Исходные данные: $m_п = 106$ кг, $n_н = 375$ об/мин, $H = 48{,}6\cdot 10^{-2}$ м, $h_{mp} = 18{,}8\cdot 10^{-2}$ м.

Из (9-49)

$$R = (48{,}6 + 0{,}5\cdot 18{,}8)\cdot 10^{-2} = 58\cdot 10^{-2} м;$$

по (9-52)

$$C_1 = 11{,}0\cdot 10^3\cdot 106\cdot 58\cdot 10^{-2} \times \left(\frac{1{,}2\cdot 375}{1000}\right)^2 = 139\,500 \text{ Н}.$$

Внутренний диаметр болта по (9-53)

$$d_0 = \sqrt{\frac{1{,}2\cdot 4\cdot 139\,500}{3{,}14\cdot 2\cdot 1200\cdot 10^6}} = 2{,}98\cdot 10^{-2} \text{ м} = 29{,}8 \text{ мм}.$$

По диаметру $d_0 = 29{,}8$ мм выбирается ближайший по размеру болт М36 ($d_0 = 31{,}67$ мм).

Расчет межполюсных распорок. При вращении ротора на проводник обмотки возбуждения действует центробежная сила $G_п$, направленная по радиусу ротора. Эту силу, приложенную к центру тяжести проводника, можно разложить на две составляющие, одна из которых направлена по продольной оси полюса,

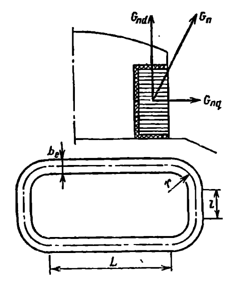


Рис. 9-36. К расчету межполюсных распорок.

а другая — перпендикулярно этой оси (рис. 9-36). Продольная составляющая воспринимается полюсным наконечником, а поперечная составляющая стремится выгнуть проводник в межполюсное пространство. Поперечная составляющая одинако-

ва для всех проводников катушки, т. е. не зависит от положения витка по высоте полюса. Напряжение на изгиб, Па, в медном проводнике катушки полюса определяют по формулам:

а) для катушки с двумя радиусами закругления (рис. 9-36)

$$\sigma_и = 0{,}49 \frac{2r + l}{2b_e} (2r + L)^2 \times \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 k \cdot 10^8; \quad (9\text{-}54)$$

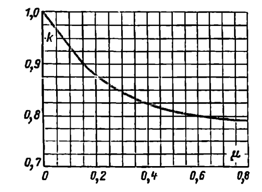


Рис. 9-37. Зависимость $k = f(\mu)$.

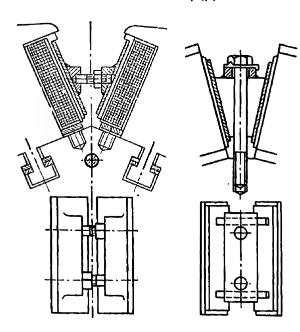


Рис. 9-38. Межполюсные распорки

б) для катушки с одним радиусом закругления

$$\sigma_и = 0{,}98 \frac{r}{2b_e} (2r + L)^2 \times \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 k \cdot 10^8. \quad (9\text{-}55)$$

Индексы в формулах соответствуют обозначениям на рис. 9-36. Значения r, l, L и b_e подставляются в метрах.

Уменьшение напряжений при увеличении отношения $\mu = r/L$ учитывают коэффициентом k (рис. 9-37).

Если напряжение на изгиб медного проводника, полученное по (9-54) или (9-55), меньше или равно 50 МПа, то межполюсные распорки можно не ставить. Если же $\sigma_и > 50$ МПа, то для укрепления обмотки между катушками следует поставить распорки (рис. 9-38). Их количество по длине машины m_p определяется по формуле

$$m_p = \sqrt{\frac{\sigma_и}{500 \cdot 10^5}} - 1; \quad (9\text{-}56)$$

m_p принимается равным ближайшему целому числу.

Напряжение в медном проводнике при наличии распорок, Па,

$$\sigma_{пр} = \frac{\sigma_и}{(m_p + 1)^2}. \quad (9\text{-}57)$$

Боковое давление на распорку, Н,

$$N = 0{,}981 a_e b_e w_c \left(\frac{2r + l}{2}\right) \times \left(\frac{2r + L}{m_p + 1}\right) \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^8. \quad (9\text{-}58)$$

Пример расчета. Исходные данные: $n_н = 750$ об/мин, $L = 66 \cdot 10^{-2}$ м, $l = 17{,}7 \times 10^{-2}$ м, $r = 5{,}95 \cdot 10^{-2}$ м, $a_e = 0{,}21 \cdot 10^{-2}$ м, $b_e = 3{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $w_c = 65$, катушка — с двумя радиусами закругления

$$\mu = \frac{5{,}95 \cdot 10^{-2}}{66 \cdot 10^{-2}} = 0{,}09.$$

По рис. 9-37 $k = 0{,}93$.
Из (9-54)

$$\sigma_и = 0{,}49 \frac{(2 \cdot 5{,}95 + 17{,}7) \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-2}} \times (2 \cdot 5{,}95 + 66)^2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \times 0{,}93 \cdot 10^8 = 940 \cdot 10^5 \text{ Па} > 50 \text{ МПа}.$$

Определяем число распорок:

$$m_p = \sqrt{\frac{940 \cdot 10^5}{500 \cdot 10^5}} - 1 = 0{,}37;$$

берем $m_p = 1$, тогда

$$\sigma_{пр} = \frac{940 \cdot 10^5}{(1 + 1)^2} = 234 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Боковое давление на распорку по (9-58)

$$N = 0{,}981 \cdot 0{,}21 \cdot 10^{-2} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-2} \times \times 65 \left[\frac{(2 \cdot 5{,}95 + 17{,}7) \cdot 10^{-2}}{2}\right] \times \times \left[\frac{(2 \cdot 5{,}95 + 66) \cdot 10^{-2}}{1+1}\right] \times \times \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \cdot 10^9 = 21\,800 \text{ Н}.$$

Расчет кромки полюсного наконечника. Наиболее опасным сечением полюсного наконечника является сечение $A—A$ (рис. 9-39). Кромка полюса испытывает изгибающий момент от центробежных сил обмотки и самой кромки. При наличии межполюсных распорок, опертых на кромку полюса, на нее будут также действовать моменты от сил бокового давления обмотки через распорку и от центробежной силы распорки. Поэтому при проектировании полюса, главным образом полюса быстроходных машин, необходимо проверить напряжение в кромке.

Центробежная сила одного метра обмотки, Н/м,

$$C_в = 10{,}3 a_e b_e w_e R_в \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^7. \quad (9\text{-}59)$$

Центробежная сила кромки полюса, Н/м,

$$C_{кр} = 11{,}0 m_{кр} R_к \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9\text{-}60)$$

где $m_{кр}$ — масса кромки полюса, кг/м;

$R_в$ и $R_к$ — расстояния от оси вращения до центра тяжести обмотки и кромки полюса, м;

a_e и b_e — размеры проводника обмотки возбуждения, м.

Сила, действующая на 1 м кромки от бокового давления обмотки через распорку, Н/м,

$$C'_р = N \frac{\operatorname{tg} \alpha}{B}, \quad (9\text{-}61)$$

где N — сила бокового давления на распорку по (9-58);

$\alpha = 180°/2p$ — половина угла между соседними полюсами;

B — опорная на кромку длина (аксиальная) распорки, м.

Сила, действующая на 1 м кромки, от центробежной силы распорки, Н/м,

$$C''_р = \frac{C_р}{2B \cos \alpha}, \quad (9\text{-}62)$$

где $C_р$ — полная центробежная сила распорки, Н:

$$C_р = 11{,}0 m_р R_р \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3;$$

$m_р$ — полная масса распорки, кг;

$R_р$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести распорки, м.

Изгибающий момент в сечении $A—A$ на единицу длины, Н·м/м,

$$M_и = C_в l_в + C_{кр} l_{кр} + (C'_р + C''_р) l_р, \quad (9\text{-}63)$$

где $l_в$, $l_{кр}$, $l_р$ — плечи сил до центра сечения $A—A$, м.

Напряжение от изгиба в кромке полюсного наконечника, Па,

$$\sigma_к = 6M_и / h_к^2, \quad (9\text{-}64)$$

где $h_к$ — высота сечения $A—A$ кромки полюса, м.

Допустимое напряжение в кромке от изгиба для стали Ст3 составляет 70 МПа при толщине листов полюса 1 мм и 100 МПа при толщине листов полюса 1,5 мм. При наличии демпферной обмотки допустимые напряжения соответственно будут 90 и 130 МПа. Если в сечение $A—A$ попадает отверстие для стержня демпферной (пусковой) обмотки, то из высоты сечения следует вычесть высоту шлица и диаметр паза. При смещении паза плечи $l_в$, $l_{кр}$ и $l_р$ следует брать до центра тяжести сечения $A''—A'$, как показано на рис. 9-39, при этом высоту сечения принимают равной $A''—A'$.

Пример расчета. Исходные данные: $n_н = 750$ об/мин, $a_e = 0{,}21 \cdot 10^{-2}$ м, $b_e = 3{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $w_e = 65$, $\alpha = 22{,}5°$, $R_к = 59{,}2 \times 10^{-2}$ м, $R_в = 48{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $C_р = 8900$ Н, $B = 8 \cdot 10^{-2}$ м, масса кромки $m_{кр} = 17{,}3$ кг/м, $N = 21\,800$ Н, $l_в = 2{,}2 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{кр} = 2 \cdot 10^{-2}$ м, $l_р = 3{,}8 \cdot 10^{-2}$ м, $h_к = 4{,}8 \times 10^{-2}$ м.

Из (9-59)

$$C_в = 10{,}3 \cdot 0{,}21 \cdot 10^{-2} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-2} \cdot 65 \cdot 48{,}5 \times 10^{-2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \cdot 10^7 = 192 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (9-60)

$$C_{кр} = 11{,}0\cdot 17{,}3\cdot 59{,}2\cdot 10^{-2}\left(\frac{1{,}2\cdot 750}{1000}\right)^2 \times$$
$$\times 10^3 = 91{,}5\cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (9-61)

$$C'_р = 21\,800\frac{0{,}41}{8\cdot 10^{-2}} = 112\cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

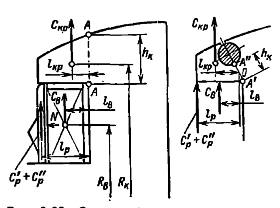


Рис. 9-39. Силы, действующие на кромку полюса.

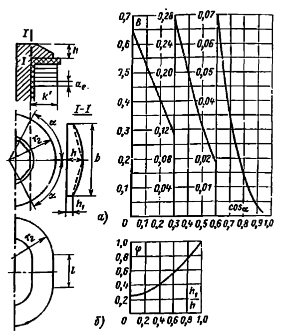


Рис. 9-40. К расчету козырька щеки полюса.

из (9-62)

$$C''_р = \frac{8900}{2\cdot 8\cdot 10^{-2}\cdot 0{,}91} = 60{,}0\cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Изгибающий момент по (9-63)

$$M_и = 192\cdot 10^3\cdot 2{,}2\cdot 10^{-2} + 91{,}5\cdot 10^3\cdot 2\cdot 10^{-2} +$$
$$+ (112 + 60)\cdot 10^3\cdot 4{,}0\cdot 10^{-2} = 13\,000 \text{ Н·м/м}.$$

Напряжение от изгиба в кромке по (9-64)

$$\sigma_к = \frac{6\cdot 130\cdot 10^2}{4{,}8^2\cdot 10^{-4}} = 337\cdot 10^5 \text{ Па} < 90 \text{ МПа}.$$

Расчет козырька щеки полюса. На козырек щеки действует центробежная сила лобовой части обмотки возбуждения, которая стремится его отогнуть. Наибольшее напряжение изгиба возникает в месте перехода козырька к нажимной части щеки (сечение I—I на рис. 9-40, *а*). Момент центробежных сил лобовой части обмотки, имеющей один радиус закругления (рис. 9-40), Н·м,

$$M_и = 10{,}3 a_e w_e R_в r_2^3 B\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^7; \qquad (9\text{-}65)$$

для обмотки, имеющей двухрадиусное закругление, Н·м,

$$M_и = 10{,}3 a_e w_e R_в\left(Br_2^3 + \frac{lk'^2}{2}\right)\times$$
$$\times\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^7, \qquad (9\text{-}66)$$

где $R_в$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести сечения обмотки, м;
l — длина прямолинейного участка лобовой части обмотки, м;
B — по кривой рис. 9-40;

$$\cos\alpha = 1 - k'/r_2;$$

l, k', r_2, м—по рис. 9-40.

Момент сопротивления козырька щеки в сечении I—I, м³,

$$W = \frac{bh^2}{6}\varphi, \qquad (9\text{-}67)$$

где b и h, м — по рис. 9-40;
φ — по кривой рис. 9-40 в зависимости от отношения h_1/h.

Напряжение изгиба в сечении I—I козырька щеки, Па,

$$\sigma_и = 1{,}15 M_и/W. \qquad (9\text{-}68)$$

Коэффициент 1,15 учитывает увеличение напряжения от собственной центробежной силы козырька щеки.

Допустимое напряжение для стали Ст3 $\sigma_и = 120$ МПа, для стали Ст5 $\sigma_и = 150$ МПа.

Пример расчета. Исходные данные: $n_н = 750$ об/мин, $a_e = 0{,}21\cdot 10^{-2}$ м, $w_e = 65$, $R_в = 48{,}5\cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = 7{,}5\cdot 10^{-2}$ м, $l = 17{,}7\cdot 10^{-2}$ м, $k' = 4{,}5\cdot 10^{-2}$ м, $b = 25\times 10^{-2}$ м, $h = 2{,}8\cdot 10^{-2}$ м, $h_1 = 1{,}4\cdot 10^{-2}$ м.

$$\cos\alpha = 1 - \frac{4,5\cdot 10^{-2}}{7,5\cdot 10^{-2}} = 0,4.$$

По рис. 9-40 $B = 0,2$.

Из (9-66)

$$M_{\text{и}} = 10,3\cdot 0,21\cdot 10^{-2}\cdot 65\cdot 48,5\cdot 10^{-2}\times$$
$$\times\left(0,2\cdot 7,5^3\cdot 10^{-6} + \frac{17,7\cdot 4,5^2\cdot 10^{-4}}{2}\right)\times$$
$$\times\left(\frac{1,2\cdot 750}{1000}\right)^2\cdot 10^7 = 14,4\cdot 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

из (9-67)

$$W = \frac{25\cdot 10^{-2}\cdot 2,8^2\cdot 10^{-4}}{6}0,44 = 14,5\cdot 10^{-6}\text{ м}^3$$

$$\left(\text{при } h_1/h = \frac{1,4\cdot 10^{-2}}{2,8\cdot 10^{-2}} = 0,5 \text{ по рис. 9-40}\right.$$
$$\left.\varphi = 0,44\right).$$

Напряжение изгиба по (9-68)

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{1,15\cdot 14,4\cdot 10^2}{14,5\cdot 10^{-6}} = 1140\cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Расчет лобовой части катушки полюса. У машин относительно небольшой мощности или имеющих невысокую частоту вращения иногда центробежные силы, действующие на лобовые части обмотки возбуждения, получаются небольшими. В этом случае у щеки полюса можно не делать козырька, поддерживающего лобовые части обмотки. При решении вопроса о целесообразности установки щеки с козырьком или без него можно исходить из нижеследующего расчета.

Статический момент площади лобовой части, м³,

$$\left.\begin{aligned} M &= B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3 + \\ &+ b_e l (r_2 - x + 0,5b_e);\\ \text{при } l &= 0\\ M &= B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3, \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}69)$$

где b_e — ширина проводника катушки, м;

r_1, r_2, l, x, м — по рис. 9-41;

B_1 и B_2 — коэффициенты, значения которых берутся по рис. 9-40 по $\cos\alpha_2 = x/r_2$ для B_2 или $\cos\alpha_1 = x/r_1$ для B_1.

Напряжение изгиба в меди от собственной центробежной силы, Па,

$$\sigma = 0,295\frac{Mr}{b_e a_e}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^0, \quad (9\text{-}70)$$

где r — расстояние от оси вращения до наиболее удаленного витка, м;

a_e — толщина проводника обмотки возбуждения, м.

Если расчетное напряжение изгиба меди превышает $500\cdot 10^5$ Па, то применяют щеку с козырьком.

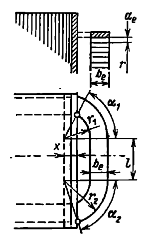


Рис. 9-41. Лобовая часть катушки полюса.

Пример расчета. Исходные данные: $2p = 20$, $n_{\text{н}} = 300$ об/мин, $a_e = 0,353\times 10^{-2}$ м, $b_e = 1,68\cdot 10^{-2}$ м, $r_2 = 4\cdot 10^{-2}$, $r_1 = 5,68\cdot 10^{-2}$ м, $r = 67,4\cdot 10^{-2}$ м, $l = 5,2\cdot 10^{-2}$ м, $x = 1,8\cdot 10^{-2}$ м.

Из (9-69)

$$M = 0,26\cdot 5,68^3\cdot 10^{-6} - 0,158\cdot 4^3\cdot 10^{-6} +$$
$$+ 1,68\cdot 10^{-2}\cdot 5,2\cdot 10^{-2}(4 - 1,8 +$$
$$+ 0,5\cdot 1,68)\cdot 10^{-2} = 63,6\cdot 10^{-6}\text{ м}^3.$$

$$\text{Для } \cos\alpha_2 = \frac{1,8\cdot 10^{-2}}{4\cdot 10^{-2}} = 0,45$$

$$\text{и } \cos\alpha_1 = \frac{1,8\cdot 10^{-2}}{5,68\cdot 10^{-2}} = 0,32$$

по рис. 9-40 $B_2 = 0,158$, $B_1 = 0,26$.

Напряжение изгиба по (9-70)

$$\sigma = 0,295\frac{63,6\cdot 10^{-6}\cdot 67,4\cdot 10^{-2}}{1,68\cdot 10^{-2}\cdot 0,353\cdot 10^{-2}}\times$$
$$\times\left(\frac{1,2\cdot 300}{1000}\right)^2\cdot 10^0 = 278\cdot 10^5 \text{ Па}.$$

У данной машины можно применять щеку без козырька.

9-6. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТОПРОВОДА РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

В синхронных машинах общего назначения мощностью свыше 100 кВт магнитопровод ротора име-

ет два вида исполнения. У быстроходных машин магнитопровод выполняется из отдельных дисков (рис. 9-42), которые затем стягиваются шпильками, либо заклепками, либо электросварочным швом. Полюсы к магнитопроводу крепятся с помощью хвостов. В тихоходных машинах ротор выполняется в виде

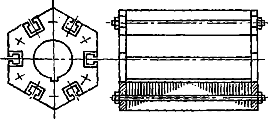


Рис. 9-42. Шихтованный ротор синхронной машины.

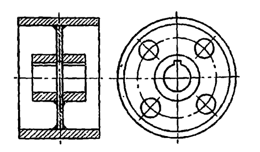


Рис. 9-43. Ротор синхронной машины в виде сварного магнитного колеса.

магнитного колеса (рис. 9-43), к ободу которого шпильками прикрепляются полюсы.

При вращении ротора его магнитопровод испытывает растягивающее напряжение центробежной силы, обусловленной собственной силой тяжести и силой тяжести прикрепленных к нему полюсов. Для того чтобы центробежная сила не вызывала остаточной деформации в магнитопроводе, необходимо, чтобы максимальные напряжения были меньше или равны допустимым. Напряжения в магнитопроводе ротора определяются из расчета его на прочность.

а) Расчет дискового ротора

Магнитопровод ротора можно разбить на две части: собственно магнитопровод, ограниченный внутренним отверстием вала радиусом R_1 и окружностью радиусом R_2 (до дна пазов), и хвостовую зону, ограниченную внешним контуром сердечника и окружностью радиуса R_2 (см. рис. 9-34).

Масса хвостовой зоны на 1 м длины ротора, кг/м,

$$m'_x = 7800\left(2pA\frac{H}{2} - \pi R_2^2\right), \quad (9\text{-}71)$$

где A, H, R_2, м — по рис. 9-34.

Центробежная сила хвостовой зоны на 1 м длины, Н/м,

$$C'_x = 11{,}0m'_x\frac{H+R_2}{2}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^3. \quad (9\text{-}72)$$

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины, Н/м,

$$C' = 11{,}0\left(m'_m + m'_{к.в}\right)R\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^3, \quad (9\text{-}73)$$

где m'_m и $m'_{к.в}$ — массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м, по (9-51) и (9-50).

R — средний радиус центра тяжести полюса, м.

Радиальное напряжение на поверхности радиуса R_2, Па,

$$\sigma_p = \frac{2pC' + C'_x}{2\pi R_2}. \quad (9\text{-}74)$$

Максимальное тангенциальное напряжение, которое возникает на внутренней поверхности магнитопровода радиусом R_1, Па,

$$\sigma_т = \frac{2}{1-\alpha^2}\sigma_p + T_1 R_2^2\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot 10^4, \quad (9\text{-}75)$$

где T_1 — коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $\alpha = R_1/R_2$ по следующей формуле:

$$T_1 = 72{,}4(1 + 0{,}212\alpha^2)\cdot 10^2. \quad (9\text{-}76)$$

Тангенциальное напряжение в стали магнитопровода ротора с учетом ослабления шпоночной канавкой, Па,

$$\sigma'_т = \sigma_т\frac{R_2 - R_1}{h_{min}}. \quad (9\text{-}77)$$

Если в магнитопроводе имеется отверстие для стяжной шпильки, то

из h_{min} следует вычесть диаметр этого отверстия. Напряжение в стали магнитопровода $\sigma_т'$ не должно превышать 130 МПа.

Пример расчета. Исходные данные: $2p=8$, $n_п=750$ об/мин, $A=32{,}8\times\times10^{-2}$ м, $H=39{,}6\cdot10^{-2}$ м, $R_1=13\cdot10^{-2}$ м, $R_2=30{,}4\cdot10^{-2}$ м, $R=51{,}5\cdot10^{-2}$ м, $m_{п}'+$ $+m_{к,в}'=590$ кг/м, $h_{min}=16{,}5\cdot10^{-2}$ м.

По (9-71)

$$m_x=7800\left(8\cdot32{,}8\cdot10^{-2}\frac{39{,}6\cdot10^{-2}}{2}-\right.$$
$$\left.-\pi\cdot30{,}4^2\cdot10^{-4}\right)=1800\ \text{кг/м};$$

по (9-72)

$$C_x'=11{,}0\cdot1800\frac{(39{,}6+30{,}4)\cdot10^{-2}}{2}\times$$
$$\times\left(\frac{1{,}2\cdot750}{1000}\right)^2\cdot10^3=5600\cdot10^3\ \text{Н/м};$$

по (9-73)

$$C'=11{,}0\cdot590\cdot51{,}5\cdot10^{-2}\left(\frac{1{,}2\cdot750}{1000}\right)^2\times$$
$$\times10^3=2720\cdot10^3\ \text{Н/м}.$$

Радиальное напряжение по (9-74)

$$\sigma_р=\frac{(8\cdot2720+5600)\cdot10^3}{2\pi\cdot30{,}4\cdot10^{-2}}=145\cdot10^5\ \text{Па}.$$

По (9-76)

$$T_1=72{,}4\left[1+0{,}212\left(\frac{13}{30{,}4}\right)^2\right]\cdot10^2=75\cdot10^2.$$

Тангенциальное напряжение по (9-75) и (9-77)

$$\sigma_т=\frac{2}{1-\left(\frac{13}{30{,}4}\right)^2}\,145\cdot10^5+75\cdot10^2\times$$
$$\times30{,}4^2\cdot10^{-4}\left(\frac{1{,}2\cdot750}{1000}\right)^2\cdot10^4=500\cdot10^5\ \text{Па};$$

$$\sigma_т'=500\cdot10^5\frac{(30{,}4-13)\cdot10^{-2}}{16{,}5\cdot10^{-2}}=525\cdot10^5\ \text{Па}.$$

б) Расчет ротора в виде магнитного колеса

Магнитное колесо представляет собой сварную конструкцию, состоящую из стальной втулки, насаживаемой на вал, обода, к которому прикрепляются полюсы, и диска, соединяющего втулку и обод. Иногда в диске делают отверстия, между которыми образуются своеобразные спицы (рис. 9-44).

Центробежная сила обода, Н,

$$C_o=11{,}0m_oR_o\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot10^3,\quad(9\text{-}78)$$

где m_o — масса обода, кг:

$$m_o=\frac{\pi}{4}\left(D_1^2-D_2^2\right)l_j\cdot7800=$$
$$=6{,}15\cdot10^3\left(D_1^2-D_2^2\right)l_j;\quad(9\text{-}79)$$

$R_o=0{,}25(D_1+D_2)$ — средний радиус обода, м.

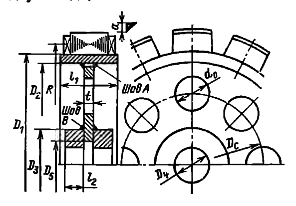


Рис. 9-44. К расчету ротора в виде сварного магнитного колеса.

Центробежная сила полюсов с обмотками, Н,

$$C_п=11{,}0m_пR\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)\cdot10^3,\quad(9\text{-}80)$$

где $m_п$ — масса всех полюсов с обмотками, кг:

$$m_п=m_{м,в}+m_{м,с}+m_{м,к,з}+m_m.\quad(9\text{-}81)$$

Массы $m_{м,в}$, $m_{м,с}$, $m_{м,к,з}$ и m_m определяют из электромагнитного расчета по формулам (7-150)—(7-153);

R — радиус центра тяжести полюса с обмотками, м, по (9-49).

Сила, растягивающая втулку, Н,

$$N=\frac{C_o+C_п}{\alpha m},\quad(9\text{-}82)$$

где α — расчетный коэффициент:

$$\alpha=1+\frac{S_1}{R_o}\left(\frac{R_2}{S_2}+\frac{2\pi}{m}\,\frac{l_c}{S_c}\right);\quad(9\text{-}83)$$

$S_1=0{,}5(D_1-D_2)l_j$ — площадь сечения обода, м²;

$S_2=0{,}5(D_3-D_4)2l_2$ — площадь сечения втулки, м²;

$S_c=b_ct$ — площадь сечения спицы, м²;

$b_c=\frac{\pi D_c}{m}-d_o$ — расчетная ширина спицы, м;

m — число спиц;

D_1, D_2, D_3, D_4, D_c, d_0, t — размеры, м, по рис. 9-44.

Сила, передаваемая на втулку, Н,

$$Q = N\frac{(D_3 - D_4)\, l_2}{S_2}. \qquad (9\text{-}84)$$

Напряжения при максимальной частоте вращения, Па:

в ободе на растяжение без учета спиц

$$\sigma_0 = \frac{C_0 + C_п}{2\pi S_1}; \qquad (9\text{-}85)$$

во втулке

$$\sigma_{вт} = \frac{mN}{2\pi S_2}; \qquad (9\text{-}86)$$

в швах A

$$\sigma_1' = \frac{N}{a_1 b_c}\,\frac{D_c}{D_2}; \qquad (9\text{-}87)$$

в швах $Б$

$$\sigma_2' = \frac{mQ}{\pi (D_3 + D_5)\, a_2},$$

где a_1 и a_2 — размеры сварочных швов A и $Б$, м (см. рис. 9-44). Можно принять

$$a_1 = a_2 = a \approx (1 \div 1{,}5)\cdot 10^{-2}\ м. \qquad (9\text{-}88)$$

Напряжения при номинальной частоте вращения в швах $Б$, Па:

на растяжение

$$\sigma_2 = \sigma_2'\left(\frac{n_н}{n_{max}}\right)^2; \qquad (9\text{-}89)$$

на срез

$$\tau_2 = \frac{0{,}45 k_1 M_н D_3}{a_2\left(D_3^3 - D_5^3\right)}, \qquad (9\text{-}90)$$

где k_1 — коэффициент перегрузки: $k_1 = 1{,}7 \div 2{,}5$;

$$M_н = 9550\frac{P_н}{n_н};$$

на срез (приведенное)

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_2^2 + 4\tau_2^2}. \qquad (9\text{-}91)$$

Допустимые напряжения в ободе и втулке принимают до 100 МПа, в швах на растяжение 80 МПа, на срез 45 МПа.

Пример расчета. Исходные данные: $P_н = 800$ кВт, $n_н = 500$ об/мин, $D_1 = 75{,}46\cdot 10^{-2}$ м, $D_2 = 64{,}46\cdot 10^{-2}$ м, $D_3 = 35\cdot 10^{-2}$ м, $D_4 = 21\cdot 10^{-2}$ м, $D_5 = 25\times 10^{-2}$ м, $D_c = 49{,}7\cdot 10^{-2}$ м, $l_j = 45\cdot 10^{-2}$ м, $l_2 = 13{,}3\cdot 10^{-2}$ м, $d_0 = 10\cdot 10^{-2}$ м, $t = 2{,}4\times 10^{-2}$ м, $R = 46\cdot 10^{-2}$ м, $m_п = 1080$ кг; $m = 4$.

Последовательно применяя (9-78)—(9-91), получаем:

$$m_0 = 6{,}15\cdot 10^3 (75{,}46\cdot 10^{-4} - 64{,}46^2\cdot 10^{-4}) \times 45\cdot 10^{-2} = 430\ кг;$$

$$R_0 = 0{,}25(75{,}46^2\cdot 10^{-2} + 64{,}46\cdot 10^2) = 35\cdot 10^{-2}\ м;$$

$$C_0 = 11{,}0\cdot 430\cdot 35\cdot 10^{-2}\left(\frac{1{,}2\cdot 500}{1000}\right)^2 \times 10^3 = 590\,000\ Н;$$

$$C_п = 11{,}0\cdot 1080\cdot 46\cdot 10^{-2}\left(\frac{1{,}2\cdot 500}{1000}\right)^2 \times 10^3 = 1\,970\,000\ Н;$$

$$S_1 = 0{,}5(75{,}46\cdot 10^{-2} - 64{,}46\cdot 10^{-2}) \times 45\cdot 10^{-2} = 248\cdot 10^{-4}\ м^2;$$

$$R_2 = 0{,}25(35\cdot 10^{-2} + 21\cdot 10^{-2}) = 14\cdot 10^{-2}\ м;$$

$$S_2 = 0{,}5(35\cdot 10^{-2} - 21\cdot 10^{-2})\cdot 2\cdot 13{,}3\cdot 10^{-2} = 186\cdot 10^{-4}\ м^2;$$

$$b_c = \frac{3{,}14\cdot 49{,}7\cdot 10^{-2}}{4} - 10\cdot 10^{-2} = 29\cdot 10^{-2}\ м;$$

$$l_c = 0{,}5(64{,}46\cdot 10^{-2} - 35\cdot 10^{-2}) = 14{,}8\cdot 10^{-2}\ м;$$

$$S_c = 29\cdot 10^{-2}\cdot 2{,}4\cdot 10^{-2} = 70\cdot 10^{-4}\ м^2;$$

$$\alpha = 1 + \frac{248\cdot 10^{-4}}{35\cdot 10^{-2}}\left(\frac{14\cdot 10^{-2}}{186\cdot 10^{-4}} + \frac{2\pi}{4}\,\frac{14{,}8\cdot 10^{-2}}{70\cdot 10^{-4}}\right) = 3{,}8;$$

$$N = \frac{590\,000 + 1\,970\,000}{3{,}8\cdot 4} = 152\,000\ Н;$$

$$Q = 152\,000\frac{(35\cdot 10^{-2} - 21\cdot 10^{-2})\cdot 13{,}3\cdot 10^{-2}}{186\cdot 10^{-4}} = 152\,000\ Н;$$

$$\sigma_0 = \frac{590\,000 + 1\,970\,000}{2\pi\cdot 248\cdot 10^{-4}} = 16{,}4\cdot 10^6\ Па;$$

$$\sigma_{вт} = \frac{4\cdot 152\,000}{2\pi\cdot 186\cdot 10^{-4}} = 5{,}2\cdot 10^6\ Па;$$

$$\sigma_1' = \frac{152\,000}{1\cdot 10^{-2}\cdot 29\cdot 10^{-2}} \times \frac{49{,}7\cdot 10^{-2}}{64{,}46\cdot 10^{-2}} = 40{,}5\cdot 10^6\ Па;$$

$$\sigma_2' = \frac{4\cdot 152\,000}{\pi(35\cdot 10^{-2} + 25\cdot 10^{-2})\cdot 1\cdot 10^{-2}} = 32{,}4\cdot 10^6\ Па;$$

$$\sigma_2 = 32{,}4\cdot 10^6\left(\frac{500}{1{,}2\cdot 500}\right)^2 = 22{,}7\cdot 10^6\ Па;$$

$$M_н = 9550\frac{800}{500} = 15\,300\ Н\cdot м;$$

$$\tau_2 = \frac{0{,}45\cdot 2\cdot 15\,300\cdot 35\cdot 10^{-2}}{1\cdot 10^{-2}(35^3\cdot 10^{-6} - 25^3\cdot 10^{-6})} = 18{,}0\cdot 10^6\ Па;$$

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2}\sqrt{(22{,}7\cdot 10^6)^2 + 4(18{,}0\cdot 10^6)^2} = 21{,}3\cdot 10^6\ Па.$$

9-7. РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Магнитопроводы роторов асинхронных двигателей и якорей машин постоянного тока с внешним диаметром менее 990 мм собираются из целых дисков, которые вырубаются из электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 9-45). В листе штампуют пазы, а при необходимости, кроме того, круглые отверстия диаметром 15—35 мм для образования вентиляционных каналов. При большой радиальной высоте листа отверстия располагаются в несколько концентрических рядов в шахматном порядке. Для посадки магнитопровода на вал в центре листа штампуется отверстие, в котором предусматриваются шпоночная канавка, а также круглая лунка — шихтовочный знак А, для того чтобы при шихтовке укладывать все листы в одно и то же положение относительно друг друга. В результате такой укладки пазы получаются с более ровными стенками. После штамповки и снятия заусенцев листы лакируются или подвергаются термообработке для создания оксидной пленки. При изготовлении роторов асинхронных двигателей с литой клеткой магнитопроводы сначала собираются из листов на оправке, а после заливки алюминиевой обмотки напрессовывают на вал. При внешних диаметрах ротора до 200—300 мм магнитопроводы сажаются на гладкий вал горячей посадкой, а при больших диаметрах на валу предусматривается шпонка.

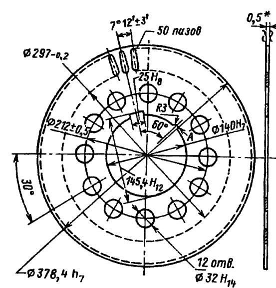


Рис. 9-45. Пример листа магнитопровода ротора.

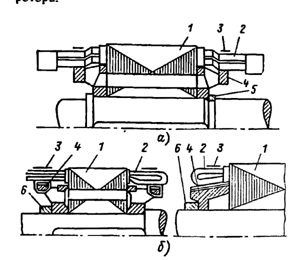


Рис. 9-46. Якорь из целых листов.

Магнитопроводы роторов, имеющих фазную обмотку или сварную клетку, а также магнитопроводы якорей машин постоянного тока набирают из листов непосредственно на вал (рис. 9-46). Магнитопроводы *1* спрессовываются стальными нажимными шайбами, которые имеют кольцевые пояса *4*, называемые обмоткодержателями, предназначенные для поддержки лобовых частей обмотки *2*. Выполнение обмоткодержателей выбирается в соответствии с формой лобовых частей обмотки.

Магнитопровод ротора или якоря в спрессованном состоянии фиксируется на валу в осевом направлении или с помощью пружинных колец *5*, врезанных в канавку на валу, или втулок *6*, насаживаемых на вал с большим натягом. Иногда для фиксации магнитопровода он с одной стороны упирается в предусмотренный на валу буртик.

Лобовые части обмотки закрепляются бандажом 3.

При внешнем диаметре ротора или якоря более 990 мм магнитопроводы набираются из штампованных сегментов электротехнической стали (рис. 9-47). В этом случае сегменты набираются на ступицах, которые имеют сварную конструкцию (рис. 9-48). Размеры сегментов выбираются исходя из наилучшего раскроя листа. Для крепления в ступице в сегментах с внутренней стороны предусматриваются выступы или углубления в форме ласточкина хвоста. Применяется также

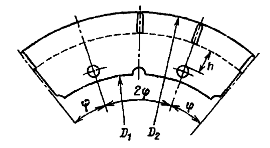


Рис. 9-47. Сегмент якоря.

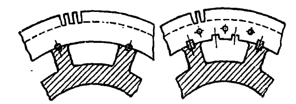


Рис. 9-48. Якорь из сегментов.

крепление сегментов на шпильках и на клиньях. Количество крепящих элементов в каждом сегменте должно быть не менее двух. В целях повышения механической прочности, а также для улучшения магнитной проводимости пакеты собираются с перекрытием сегментов при переходе от слоя к слою.

В осевом направлении сегменты якоря стягиваются нажимными фланцами и стяжными шпильками, устанавливаемыми внутри или вне сердечника.

Иногда на ступицах собираются магнитопроводы роторов (якорей) при их диаметрах менее 990 мм. Такое выполнение магнитопроводов целесообразно в том случае, когда разность между внутренним диаметром ротора (якоря), найденным из электромагнитного расчета, и диаметром вала получается значительной, а внутреннюю вырубку можно использовать для изготовления магнитопроводов меньшего диаметра.

а) Механический расчет магнитопровода

При проектировании роторов (якорей) отдельные их элементы подлежат проверке на механическую прочность.

Расчет напряжений в магнитопроводах. При вращении в магнитопроводах роторов и якорей возникают напряжения от центробежных сил. Наибольшие значения эти напряжения имеют у внутренней поверхности магнитопровода:

$$\sigma = AD_2\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \beta\cdot 10^5, \quad (9\text{-}92)$$

где D_2 — диаметр ротора (якоря), м;

β — коэффициент, учитывающий ослабление сечения листа шпоночной канавкой и вентиляционными отверстиями:

$$\beta = \frac{D_2 - 2h_п - d_к}{2H_{min}};$$

$h_п$ — глубина паза, м (рис. 9-49);

$d_к$ — диаметр вентиляционного отверстия м;

H_{min} — минимальная высота ярма ротора (якоря), м;

$$H_{min} = \frac{D_2 - d_в}{2} - h_{шп} - h_п - d_к;$$

$d_в$ — диаметр вала.

Коэффициент A определяется по табл. 9-8.

В таблице принято:

$$\varepsilon = h_п/D_2; \ \alpha = d_в/(D_2 - 2h_п).$$

Допустимое напряжение для электротехнической стали $120\times\times10^6$ Па.

Расчет колец и втулок, запирающих ротор (якорь) на валу

На кольцо, которым магнитопровод запирается на валу, действует усилие, сдвигающее нажимную шай-

Таблица 9-8

Значения коэффициента A

α	ε							
	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
0,3	0,0201	0,0208	0,0216	0,0225	0,0236	0,0247	0,0262	0,0277
0,4	0,0208	0,0217	0,0227	0,0238	0,0250	0,0263	0,0278	0,0296
0,5	0,0219	0,0230	0,0241	0,0254	0,0269	0,0285	0,0304	0,0324
0,6	0,0237	0,0249	0,0265	0,0282	0,0300	0,0320	0,0344	0,0369
0,7	0,0259	0,0280	0,0303	0,0328	0,0354	0,0382	0,0414	0,0440

бу вдоль оси. Это усилие, Н, вызывается упругостью спрессованного пакета и находится по формуле

$$Q = \frac{\pi}{4}\left(D_{п}^2 - d_{в}^2\right) q, \qquad (9\text{-}93)$$

где $D_{п} = D_2 - h_{п}$ — диаметр окружности, проведенной через середины пазов, м;

q — упругость спрессованного пакета, берется как $^1/_3$ усилия прессовки: $q = (0{,}5 \div 1)\cdot 10^6$ Па.

Большие значения q выбираются для машин меньшей мощности. Напряжение на срез кольца прямоугольного сечения, Па,

$$\tau = \frac{Q}{\pi d_{в} b}, \qquad (9\text{-}94а)$$

где b — ширина кольца, м.

Для кольца круглого сечения диаметром d_1

$$\tau = \frac{Q}{\pi d_{в} d_i}. \qquad (9\text{-}94б)$$

Допустимое значение τ для колец, выполненных из стали, принимается $60\cdot 10^6$ Па.

Втулка, запирающая сердечник ротора (якоря) на валу, также находится под действием силы Q, определяемой по (9-93). Для предотвращения сдвига втулки на валу под действием этой силы необходимо, чтобы сила сцепления втулки с валом P превышала силу Q не менее чем в 1,2 раза. Сила P зависит от натяга, т. е. разницы внутреннего диаметра втулки и наружного диаметра вала. Необходимая величина натяга рассчитывается исходя из геометрических размеров вала, втулки и силы Q, а затем по «Единой системе допусков и посадок» (стандарт СТ СЭВ 144-75) выбирается стандартная посадка. В соответствии с выбранной посадкой устанавливаются допуски на изготовление вала и втулки. После этого уточняется усилие сдвига втулки и проверяется максимальное напряжение на втулке, которое не должно превышать допустимого значения для материала, из которого изготовлена втулка.

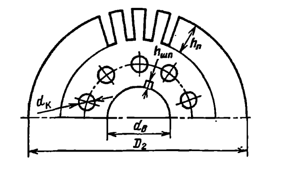


Рис. 9.49. К расчету напряжения в листе магнитопровода якоря.

Расчет натяга и выбор посадки ведутся в следующем порядке.

Определяется давление, Па, на посадочную поверхность из формулы

$$p_y = \frac{P}{Sf} = \frac{1{,}2Q}{\pi d_{в} l f}, \qquad (9\text{-}95)$$

где f — коэффициент трения между сопрягающимися поверхностями (для сталей и чугунов в среднем $f = 0{,}1 \div 0{,}15$);

S — площадь посадочной поверхности, м²: $S = \pi d_{в} l$ ($d_{в}$ и l — внутренний диаметр и длина втулки).

Затем определяется необходимый минимальный натяг Δ_{min}, м:

$$\Delta_{min} = p_y d_{в}/\Theta, \qquad (9\text{-}96)$$

где Θ — коэффициент; если вал и втулка изготовлены из стали, а вал не имеет отверстия, то

$$\Theta = \frac{E}{1 + \frac{D_в^2 + d_в^2}{D_в^2 - d_в^2}};$$

E — модуль нормальной упругости (для сталей $E=2{,}1\cdot10^{11}$ Па);

$D_в$ — наружный диаметр втулки, м.

По полученному значению натяга Δ_{min} выбирается стандартная посадка, имеющая натяг, близкий к расчетному.

Максимальное напряжение на втулке определяется по формуле

$$\sigma = \frac{2p_у'}{1 - \left(\frac{d_в}{D_в}\right)^2}. \qquad (9\text{-}97)$$

Значение $p_у'$ определяют из (9-96) при максимальном натяге Δ_{max}.

Пример расчета втулки, запирающей сердечник якоря на валу.

$D_п = 26{,}5\cdot10^{-2}$ м, $d_в = 8\cdot10^{-2}$ м, $D_в = 11{,}5\cdot10^{-2}$ м, $l = 3{,}5\cdot10^{-2}$ м, $q = 5\cdot10^6$ Па.

По (9-93)

$$Q = \frac{3{,}14}{4}(26{,}5^2 - 8^2)\cdot10^{-4}\cdot5\cdot10^6 = 25\,000 \text{ Н};$$

по (9-95)

$$p_у = \frac{1{,}2\cdot25\,000}{\pi\cdot8\cdot10^{-2}\cdot3{,}5\cdot10^{-2}\cdot0{,}15} = 227\cdot10^5 \text{ Па}.$$

Необходимый минимальный натяг из (9-96)

$$\Delta_{min} = \frac{227\cdot10^5\cdot8\cdot10^{-2}}{5{,}45\cdot10^{10}} = 332\cdot10^{-7} \text{ м}.$$

$$\Theta = \frac{2{,}1\cdot10^{11}}{1 + \frac{(11{,}5^2 + 8^2)\cdot10^{-4}}{(11{,}5^2 - 8^2)\cdot10^{-4}}} = 5{,}45\cdot10^{10} \text{ Па}.$$

По стандарту СТ СЭВ 144-75 выбираем посадку $80\frac{H_7\left({}^{+30}_{0}\right)}{t_6\left({}^{+94}_{+75}\right)}$ (допуски для вала ${}^{+94}_{+75}$ мкм, а для втулки ${}^{+30}_{0}$ мкм). При этой посадке минимальный натяг $\Delta_{min}=75-30=45$ мкм ($450\cdot10^{-7}$ м), максимальный натяг $\Delta_{max}=94-0=94$ мкм (940×10^{-7} м).

Уточняем давление на посадочную поверхность при минимальном натяге по (9-96):

$$p_у = \frac{450\cdot10^{-7}\cdot5{,}45\cdot10^{10}}{8\cdot10^{-2}} = 306\cdot10^5 \text{ Па}.$$

Уточняем силу P по (9-95):

$$P = 306\cdot10^5\pi\cdot8\cdot10^{-2}\cdot3{,}5\cdot10^{-2}\cdot0{,}15 = 40\,300 \text{ Н}.$$

$$\frac{P}{Q} = \frac{40\,300}{25\,000} = 1{,}615 > 1{,}2.$$

Давление при максимальном натяге

$$p_у' = \frac{900\cdot10^{-7}}{8\cdot10^{-2}}\cdot5{,}45\cdot10^{10} = 614\cdot10^5 \text{ Па}.$$

Напряжение на растяжение в сечении втулки по (9-97)

$$\sigma = \frac{2\cdot614\cdot10^5}{1 - \left(\frac{8\cdot10^{-2}}{11{,}5\cdot10^{-2}}\right)^2} = 240\cdot10^6 < 0{,}7\cdot360\cdot10^6 \text{ Па}.$$

Проверка прочности зубцов. Зубцы магнитопроводов нагружены центробежной силой, силами от собственного веса, а также от веса обмотки и изоляции, лежащих в пазу. Наиболее слабым в механическом отношении является сечение в основании зубца шириной b_z. Напряжение растяжения в этом сечении определяется по формуле, Па,

$$\sigma = C_{zп}'/b_z. \qquad (9\text{-}98)$$

Центробежная сила зубца и содержимого паза на 1 м длины якоря, Н/м,

$$C_{zп}' = 5{,}5\left(m_z' + m_{о,и}'\right)\left(D_2 - h_п\right) \times \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2\cdot10^3, \qquad (9\text{-}99)$$

где D_2, $h_п$ — внешний диаметр ротора (якоря) и высота паза, м.

Масса зубца на 1 м длины якоря, кг,

$$m_z' = 7{,}8b_{zср}h_п k_с\cdot10^3, \qquad (9\text{-}100)$$

где $b_{zср}$ — средняя ширина зубца, м;

$k_с$ — коэффициент заполнения пакета сталью.

Масса меди обмотки и ее изоляции на 1 м длины якоря, кг,

$$m_{о,и}' = m_о' + m_и' = \left[8{,}9q_a N_п + 2{,}5\left(b_п h_п - q_a N_п\right)\right]\cdot10^3, \qquad (9\text{-}101)$$

где q_a — сечение проводника, м²;
$N_п$ — число проводников в пазу;
$b_п$ — ширина паза, м.

Проверка прочности шпонок. Шпонки для фиксации магнитопровода обычно выбирают такого же сечения, что и на свободном конце вала. Они рассчитываются на смятие рабочих поверхностей, исходя из наибольшего значения передаваемого момента. Наибольшее распространение получили призматические шпонки. Напряжение смятия, Па,

$$\sigma = \frac{kM_{\text{н}}}{0{,}25 d_{\text{в}} h_{\text{шп}} l_{\text{шп}}}, \quad (9\text{-}102)$$

где $M_{\text{н}}$ — номинальный момент, Н·м;

$h_{\text{шп}}$, $l_{\text{шп}}$ — высота и длина шпонки, м.

Коэффициент перегрузки k выбирается в пределах 2—3.

В шпонках, изготовленных из стали Ст5, допустимое напряжение принимается приблизительно равным $150 \cdot 10^6$ Па.

б) Расчет бандажей и клиньев

В пазах роторов и якорей располагаются обмотки, на которые при вращении действуют центробежные



Рис. 9-50. Якорь машины постоянного тока с креплением обмотки бандажами.

силы. Для предотвращения перемещения в радиальном направлении обмотки должны быть надежно закреплены.

Лобовые части обмоток закрепляют бандажами, намотанными из проволоки или стекловолокна. Закрепление пазовой части обмотки посредством бандажей может применяться для машин постоянного тока относительно небольшой мощности (при диаметрах якоря до 300—350 мм), имеющих открытые пазы. Бандажи располагают в специальных канавках магнитопроводов, которые образуются в результате применения листов меньшего диаметра, чем основные (рис. 9-50).

Применение бандажей имеет определенные преимущества, так как при этом уменьшается высота зубца, что приводит к уменьшению магнитного напряжения зубцов и потерь при их перемагничивании. Однако при больших скоростях (при $v_a \geqslant 35$ м/с) применение бандажей становится нерациональным, так как бандажи перекрывают чрезмерно большую поверхность якоря, что ухудшает его теплоотдачу. Наличие проволочных бандажей понижает КПД машины из-за потерь в них, а при бандажах из магнитной проволоки ухудшается коммутация. Наличие кольцевых канавок увеличивает воздушный зазор, а следовательно, и магнитное напряжение зазора. Поэтому у более мощных машин обмотки в пазах закрепляют клиньями.

У асинхронных двигателей и машин постоянного тока, имеющих на роторе (якоре) полузакрытые пазы, крепление обмоток в активной части производят клиньями.

Расчет бандажей. Для бандажей применяют магнитную или немагнитную стальную проволоку или стеклоленту. При частотах перемагничивания более 50 Гц и в напряженных по коммутации машинах на активной части преимущественно применяют немагнитную проволоку. Диаметр проволоки для бандажей предварительно выбирают в пределах 0,8—2 мм (меньшие диаметры проволоки берут для машины с меньшим диаметром якоря).

Для уменьшения потерь бандаж на магнитопроводе подразделяют на части, для чего по длине магнитопроводов делают несколько канавок. Длину каждой канавки следует брать не больше 15—20 мм, а общая длина всех канавок не должна превышать 35% длины магнитопровода. На лобовых частях обмотки ширина бандажей может достигать 40 мм. Более широкие бандажи также следует делить на части или применять укладку в несколько слоев по высоте.

Под проволочными бандажами на пазовой и лобовой частях обмотки якоря подкладывают миканит толщиной 0,3—0,4 мм. Наружный диаметр установленных бандажей

не должен превышать наружного диаметра якоря. Для укрепления бандажей по ширине применяются скрепки из белой жести шириной 8—15 мм, припаиваемые оловянным припоем (рис. 9-51).

По сравнению с проволочными бандажи из стеклоленты, пропитанной синтетическими смолами, имеют преимущества. Они не имеют

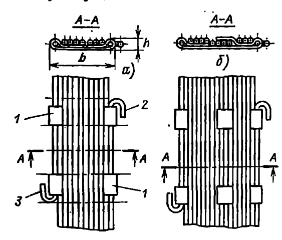


Рис. 9-51. Крепление концов проволоки бандажей якоря.

а — на магнитопроводе; б — на лобовых частях обмотки.

собственных потерь, не требуют наложения изоляции между бандажом и обмоткой, менее трудоемки в изготовлении. Недостатком таких бандажей является их большая толщина, так как стеклолента имеет меньшую механическую прочность.

При расчете бандажа исходят из того, что он испытывает напряжения от центробежных сил обмотки и самого бандажа. Число витков проволочного бандажа

$$w_б = 1{,}13\frac{m(D_2 - h_п)}{d_б(\sigma_{доп} - \sigma_0)} \times \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9\text{-}103)$$

где $d_б$ — диаметр проволоки бандажа, м;

$\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стальной бандажной проволоки $450 \cdot 10^6$ Па;

n_{max} — максимальная частота вращения, об/мин;

σ_0 — напряжение от центробежных сил бандажа, Па.

Для бандажей из стали

$$\sigma_0 = 2{,}2D_2^2\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^7. \quad (9\text{-}104)$$

При определении числа витков бандажа, располагаемого на магнитопроводе, в (9-103) подставляют массу проводников m_0 и изоляции $m_и$ пазовой части обмотки, кг:

$$m_{о,и} = m_о + m_и = m'_{о,и} Z_2 l, \quad (9\text{-}105)$$

где Z_2 — число пазов якоря;

l — полная длина магнитопровода якоря, м;

$m'_{о,и}$ — по (9-101).

Для нахождения витков бандажа с одной стороны лобовой части в (9-103) подставляют массу $m_л$, кг:

$$m_л \approx 1{,}2 \cdot 0{,}7 \cdot 8{,}9 \cdot 10^3 q_a N_п Z_2 \tau, \quad (9\text{-}106)$$

где $0{,}7\tau$ — длина лобовой части проводника, м;

τ — полюсное деление, м;

q_a — площадь поперечного сечения проводника, м^2.

Коэффициент 1,2 приближенно учитывает массу изоляции.

Число витков бандажа из стеклоленты определяют по формуле

$$w_б = 0{,}9\frac{m(D_2 - h_п)}{q_л(\sigma_{доп} - \sigma_0)}\left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9\text{-}107)$$

где $q_л$ — площадь поперечного сечения ленты, м^2;

$\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, равное $150 \cdot 10^6$ Па для стеклоленты класса нагревостойкости В и $130 \cdot 10^6$ Па для класса F.

Для бандажей из стеклоленты, Па,

$$\sigma_0 = 0{,}51D_2^2\left(\frac{n_{max}}{1000}\right) \cdot 10^7. \quad (9\text{-}108)$$

Для бандажей используется лента ЛСБ (ТУ 6.11.22-70) толщиной 0,18—0,2 мм и шириной 10, 15, 20, 25, 30 мм. Высоту бандажных канавок на сердечнике якоря выбирают от 2 до 3,5 мм.

Пример расчета. Двигатель постоянного тока $P_н = 75$ кВт, максимальная эксплуатационная частота вращения (при ослаблении поля) 2200 об/мин, $D_2 = 25{,}8 \times 10^{-2}$ м, $l = 26{,}7 \cdot 10^{-2}$ м, $Z_2 = 27$, $N_п = 12$, $h_п = 3 \cdot 10^{-2}$ м, $b_п = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ м,

$q_a = 16{,}15 \cdot 10^{-6}$ м², $q_л = 0{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \times$ $\times 10^{-3} = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ м².

Из (9-101)

$$m'_{о,п} = \left[8{,}9 \cdot 16{,}15 \cdot 10^{-6} \cdot 12 + 2{,}5 \left(1{,}2 \times \times 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} - 16{,}15 \cdot 10^{-6} \cdot 12\right)\right] \times \times 10^{3} = 2{,}145 \text{ кг}.$$

Масса пазовой части обмотки с изоляцией по (9-105)

$$m_{о,п} = 2{,}145 \cdot 27 \cdot 26{,}7 \cdot 10^{-2} = 15{,}4 \text{ кг}.$$

Напряжение от центробежных сил по (9-108)

$$\sigma_0 = 0{,}51 \cdot 25{,}8^2 \cdot 10^{-4} \left(\frac{1{,}2 \cdot 2200}{1000}\right)^2 \times \times 10^7 = 2{,}38 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

По (9-107)

$$w_б = 0{,}9 \frac{15{,}4\,(25{,}8 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2})}{3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot (150 \cdot 10^6 - 2{,}38 \cdot 10^6)} \times \times \left(\frac{1{,}2 \cdot 2200}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 50.$$

Расчет клиньев. Клинья изготовляют из гетинакса, текстолита, стеклотекстолита и дерева (бука, клена, ясеня). Клин рассчитывают на изгиб как балку с сосредоточенной нагрузкой посредине. Эта нагрузка равна центробежной силе пазовой части обмотки. Расчет производится на 1 м. Исходя из этого определяется предварительная высота клина $h_к$ (рис. 9-52), м:

$$h_к \geqslant 1{,}22 \sqrt{\frac{C' b_к}{\sigma_{доп}}}. \quad (9\text{-}109)$$

Центробежная сила пазовой части обмотки на 1 м, Н/м,

$$C' = 5{,}5 m'_{о,п} (D_2 - h_п) \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3,$$

где $m'_{о,п}$ — по (9-101);

$b_к$ — средняя ширина клина, м (рис. 9-52):

$$b_к \approx b_п + (1 \div 3) \cdot 10^{-3}.$$

Допустимые напряжения на изгиб $\sigma_{доп}$ для гетинакса 20 МПа, для текстолита 35 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза 8 и вдоль паза 4 МПа.

По найденной высоте $h_к$ из табл. 9-9 подбирают нормализованные размеры клина. Приведенные

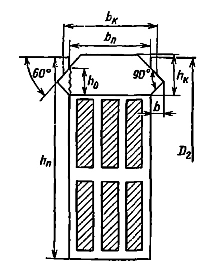


Рис. 9-52. К расчету пазового клина.

в таблице размеры даны в соответствии с рис. 9-52. По производственным соображениям высота клина должна составлять не менее $0{,}25 b_п$.

После выбора клина проводят поверочный расчет. Напряжение на изгиб, Па,

$$\sigma = 1{,}5 C' b_к / h_к^2. \quad (9\text{-}110)$$

Напряжение на срез, Па,

$$\tau = 0{,}5 C' / h_0, \quad (9\text{-}111)$$

где h_0 — в метрах по рис. 9-52 и табл. 9-9.

Допустимое напряжение на срез τ для гетинакса 10 МПа, для текстолита 15 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза 4 и вдоль паза 2 МПа.

Таблица 9-9

$h_к$, мм	3	4	5	6	7	8
$b_к$, мм	$b_п + 1$	$b_п + 1{,}2$	$b_п + 1{,}8$	$b_п + 2{,}3$	$b_п + 2{,}9$	$b_п + 3{,}2$
$h_г$, мм	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7

Пример расчета. Тот же двигатель, что и в предыдущем примере ($P_н=75$ кВт). Размеры паза: $h_п \times b_п = 3{,}6 \times 10^{-2} \times 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ м. Остальные данные те же.

Из (9-101)

$$m'_{о,н} = [8{,}9 \cdot 16{,}15 \cdot 10^{-6} \cdot 12 + 2{,}5\,(1{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{-2} - 16{,}15 \cdot 10^{-6} \cdot 12)] \cdot 10^3 = 2{,}325 \text{ кг.}$$

Центробежная сила пазовой части обмотки

$$C' = 5{,}5 \cdot 2{,}325 \cdot (25{,}8 \cdot 10^{-2} - 3{,}6 \cdot 10^{-2}) \left(\frac{1{,}2 \cdot 2200}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 19{,}8 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

Материал клина—текстолит с $\sigma = 35$ МПа. Выбираем $b_к \approx 14 \cdot 10^{-3}$ м.

Из (9-109)

$$h_к \geqslant 1{,}22 \sqrt{\frac{19{,}8 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 10^{-3}}{350 \cdot 10^5}} = 3{,}44 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

По табл. 9-9 выбираем клин с $h_к = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $b_к = 12 + 1{,}2 = 13{,}2$ мм; $h_0 = 3{,}5$ мм.

Проводим проверку:

по (9-110)

$$\sigma = 1{,}5 \frac{19{,}8 \cdot 10^3 \cdot 13{,}2 \cdot 10^{-3}}{4^2 \cdot 10^{-6}} = 24{,}4 \cdot 10^6 < 36 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

по (9-111)

$$\tau = 0{,}5 \frac{19{,}8 \cdot 10^3}{3{,}5 \cdot 10^{-3}} = 2{,}82 \cdot 10^6 < 25 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

9-8. КОЛЛЕКТОРЫ

Коллектор является ответственной и сложной частью машины постоянного тока. Он состоит из коллекторных пластин, которые изготовляются из твердотянутой меди трапецеидального сечения толщиной 3—15 мм. Иногда для повышения механической прочности пластины изготовляются из меди с присадкой кадмия. Для изоляции медных пластин друг от друга между ними укладывают прокладки из специального коллекторного миканита толщиной 0,8—1,5 мм. Набор коллекторных пластин с изоляцией между ними должен быть прочно закреплен и иметь строго цилиндрическую форму при всех режимах работы машины. Существующие конструкции коллекторов различаются по способу крепления пластин и имеют большое многообразие. Здесь рассматриваются наиболее употребляемые в современных машинах способы крепления: нажимными конусными фланцами и конструкционной пластмассой.

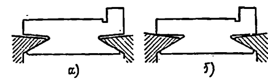


Рис. 9-53. Способы крепления коллекторных пластин.

При креплении нажимными конусными фланцами коллекторные пластины выполняют в виде ласточкина хвоста. Изоляционные прокладки между пластинами выполняют такой же формы. Коллекторы с креплением нажимными конусными фланцами подразделяют на арочные и клиновидные. В первом случае нажим на пластины осуществляется только на ласточкин хвост (рис. 9-53,*а*), а при клиновидном кроме нажатия на ласточкин хвост производится нажатие также на концы пластин (рис. 9-53,*б*).

Наибольшее распространение получили арочные коллекторы, как более технологичные. На рис. 9-54

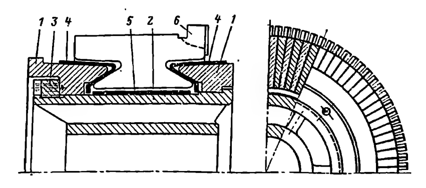


Рис. 9-54. Коллектор малых машин.

и 9-55 показаны конструкции таких коллекторов.

На рис. 9-54 нажимные фланцы *1*, надетые на втулку *2*, стягиваются кольцевой гайкой *3*. Для изоляции всех коллекторных пластин от корпуса на нажимные фланцы надевают прессованные из миканита манжеты *4*, а на втулку — миканитовый

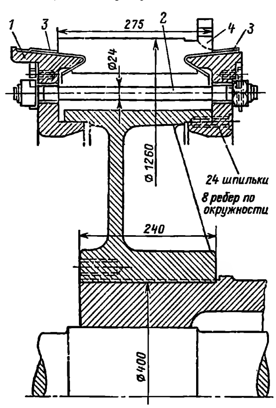


Рис. 9-55. Коллектор крупных машин.

цилиндр 5. Со стороны якоря у коллекторной пластины имеется выступ 6, называемый петушком, в котором выфрезеровывается шлиц. В этот шлиц закладываются, а затем припаиваются проводники обмотки якоря.

Рассмотренную конструкцию применяют при диаметрах коллекторов до 200—250 мм и малой длине. В коллекторах с общей длиной более 200 мм не рекомендуется применять затяжку фланцев кольцевой гайкой, так как в этом случае при нагреве пластин из-за температурной деформации происходит бочкообразный выгиб пластин.

Пример конструкции коллекторов с большими диаметрами показан на рис. 9-55. Здесь нажимные фланцы *1* стягиваются стальными шпильками *2*. На фланцы надевают миканитовые манжеты *3*. При большой разнице в диаметрах якоря и коллектора в шлиц пластины впаивают медные полоски *4* — петушки, к которым присоединяют проводники якоря.

При высоких окружных скоростях коллекторов и относительно

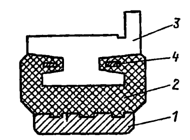


Рис. 9-56. Коллектор на пластмассе.

большой их длине для повышения прочности применяют конструкцию коллекторов с бандажными кольцами. Стальные бандажные кольца, насаженные на внешнюю поверхность коллектора, осуществляют стяжку его пластин. Для предотвращения замыкания коллекторных пластин посадку колец производят на миканитовые пояски.

В корпусе коллекторов вентилируемых машин предусматривают каналы для прохода воздуха.

В коллекторах относительно небольших размеров (с наружным диаметром до 40—50 см) в настоящее время находит широкое применение крепление пластин пластмассами (рис. 9-56). По сравнению с креплением нажимными фланцами такие коллекторы более надежны в эксплуатации в отношении сохранения правильной цилиндрической формы, имеют меньшую трудоемкость изготовления и себестоимость за счет отсутствия механической обработки пластин на станке. Для посадки коллектора на вал внутри его предусматривают стальную втулку *1*, в которой для лучшего сцепления с пластмассой проточены кольцевые канавки. Пластмассу *2* впрессовывают в пространство между втулкой и коллекторными пластинами. Для этого применяют пластмассу марки К6 или АГ-4.

В целях повышения механической прочности в углубления коллек-

торных пластин *3* вкладывают армировочные кольца *4*, выполненные из стальной проволоки или полосы. Размеры колец и число их витков зависят от диаметра коллектора. Показанная на рис. 9-56 конструкция коллектора применяется при диаметрах до 25 см.

Во избежание замыкания коллекторных пластин кольцами миканитовые прокладки между пластинами в хвостовой части имеют большие размеры, образуя выступы.

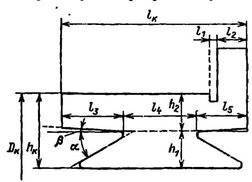


Рис. 9-57. Коллекторная пластина.

Внешний диаметр коллектора $D_к$, его общую длину $l_к$ и ширину коллекторного деления $b_к$ определяют из электромагнитного расчета. Ниже даны некоторые соотношения, позволяющие выбрать размеры коллекторных пластин (рис. 9-57). В дальнейшем эти размеры могут быть уточнены по результатам механического расчета.

Высоту коллекторной пластины принимают равной:

$$h_к \approx (0{,}80 \div 1{,}15)\sqrt{D_к}. \quad (9\text{-}112)$$

Высота ласточкина хвоста

$$h_1 \approx (0{,}5 \div 0{,}55)\, h_к. \quad (9\text{-}113)$$

Для равномерного распределения центробежных сил ласточкины хвосты стараются располагать несимметрично ($l_3 > l_5$). При выборе длины l_4 можно исходить из соотношения

$$l_4 \geqslant (1{,}2 \div 1{,}6)\, h_1. \quad (9\text{-}114)$$

Ширину выточки l_1, нужной для выхода шлифовального круга и фрезы при продорожке изоляции между пластинами, берут равной 6—8 мм.

Размер l_2 выбирается для якорей с многовитковыми секциями равным 12—15 мм, а для якорей с одновитковыми секциями 15—20 мм.

Толщина миканитовых манжет равна 1—1,5 мм, а миканитового цилиндра 0,75—1 мм.

Профиль ласточкина хвоста задается углами α и β, которые обычно применяются равными соответственно 30 и 3°. При диаметре коллектора до 15 см эти углы берутся равными 45 и 3°. Число шпилек для стягивания нажимных фланцев зависит от диаметра коллектора. При $D_к$ до 50 см число шпилек выбирается в пределах от 6 до 12. Диаметр шпилек не рекомендуется брать менее 16 мм.

а) Механический расчет коллектора с нажимными конусными фланцами

Ниже дается упрощенная методика, которая позволяет получить удовлетворительные результаты для большинства практических случаев.

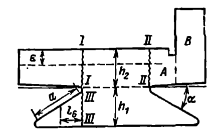


Рис. 9-58. К расчету коллектора.

Более полный расчет изложен в [2 и 34].

В предлагаемой методике механического расчета коллектора проводится проверка напряжений в наиболее опасных сечениях пластины, стяжных болтах и миканитовой манжете. Опасными сечениями коллекторных пластин являются сечения *I—I*, *II—II*, *III—III* (рис. 9-58).

При расчете напряжений в сечениях *I—I* и *II—II* консольную часть пластины рассматривают как балку с заделанным концом, на которую действует распределенная нагрузка. Распределенная нагрузка создается двумя силами: центробежной силой части пластины $C_к$ и радиальной составляющей силы

арочного распора $F_к$, которая возникает в результате сжатия пластин нажимными фланцами.

Консольные части пластины рассчитывают для изношенного коллектора. Радиальный износ ε можно принять до 20—40% h_2 (рис. 9-58).

Исходя из сказанного, напряжение изгиба в сечении $I—I$, Па, находится как

$$\sigma_{к1} = \frac{3}{2} \frac{l_3 (C_{к1} + F_{к1})}{b_{к1} (h_2 - \varepsilon)^2}, \quad (9\text{-}115)$$

где $b_{к1}$ — средняя толщина консольной части пластины, м:

$$b_{к1} = \frac{\pi (D_к - h_2 - \varepsilon)}{K} - b_п;$$

$b_п$ — толщина миканитовой прокладки;

K — число коллекторных пластин;

l_3, h_2, $D_к$ — размеры, м, по рис. 9-57.

Центробежная сила $C_{к1}$, Н, определяется по формуле

$$C_{к1} = 11 m_{к1} R_{01} \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9\text{-}116)$$

где $R_{01} = (D_к - h_2 - \varepsilon)/2$ — радиус инерции консольной части, м;

$m_{к1}$ — масса выступа (консольной части), кг;

$$m_{к1} = 8900 S_{к1} b_{к1};$$

$S_{к1}$ — площадь боковой поверхности выступа, м^2.

Радиальная составляющая силы арочного распора, Н,

$$F_{к1} = 2 p_0 S_{к1} \frac{\pi}{K}. \quad (9\text{-}117)$$

Давление между пластинами p_0 выбирают таким, чтобы обеспечить сжатие миканитовых прокладок, при котором они не имели бы возможности перемещаться радиально. Это давление может быть определено по эмпирической формуле, Па,

$$p_0 = \left[60 + 5\left(\frac{n_{max}}{1000} \frac{D_к}{10}\right)^{3/2}\right] \cdot 10^5, \quad (9\text{-}118)$$

где $D_к$ — диаметр коллектора, см.

Для сечения $II—II$ напряжение подсчитывают аналогично (с учетом петушков). При расчете напряжения от растягивающих и сжимающих сил в сечении $III—III$, Па, уголок хвоста рассматривают как балку, заделанную в этом сечении и нагруженную сосредоточенной силой:

$$\sigma_x = \frac{3 (C_x + F_{р,x}) l_6}{b_{к,x} h_1^2}, \quad (9\text{-}119)$$

где $b_{к,x}$ — толщина пластины в средней части хвоста, м:

$$b_{к,x} = \frac{\pi (D_к - 2h_2 - h_1)}{K} - b_к;$$

h_1, l_6 — размеры, м, по рис. 9-58.

Центробежную C_x и радиальную составляющие силы арочного распора $F_{р,x}$ подсчитывают по (9-116) и (9-117). При этом вместо массы $m_{к,1}$ должна быть взята полная масса коллекторной пластины и вместо $S_{к1}$ — расчетная площадь боковой поверхности пластины. Радиус инерции берется равным $R_{0к} = (D_к - h_к)/2$. Напряжения σ_x и $\sigma_к$ не должны превосходить 120 МПа.

Напряжение сжатия в миканитовых манжетах, отнесенное к 1 м^2 площади прилегания манжеты к конусу с углом α, находят как

$$\sigma_м = \frac{C_x + F_{р,x}}{2 b_{к,x} a \cos\alpha}, \quad (9\text{-}120)$$

где a, м — по рис. 9-58.

$\sigma_м$ не должно превосходить 50 МПа.

Стяжные болты рассчитываются, исходя из осевого давления, которое должны создать нажимные шайбы.

Напряжение в болтах на растяжение, Па,

$$\sigma_б = \frac{(C_x + F_{р,x}) K \operatorname{tg}\alpha}{1{,}56 d_б^2 m_б}, \quad (9\text{-}121)$$

где $d_б$ — диаметр болта, м;

$m_б$ — число болтов.

Значение $\sigma_б$ не должно превышать 300 МПа.

Когда фланцы стягиваются кольцевой гайкой, проверяют напряжение на срез витков резьбы гайки от силы запрессовки, Па:

$$\sigma_г = \frac{(C_x + F_{р,x}) K \operatorname{tg}\alpha}{2\pi D_г H_г}, \quad (9\text{-}122)$$

где $D_г$, $H_г$ — диаметр резьбы и ширина гайки, м.

Напряжение должно быть не более 80 МПа.

При нагреве коллектора возникают дополнительные напряжения вследствие неодинакового расширения меди и стали. Дополнительные напряжения учитывают путем умножения найденных выше напряжений на коэффициент 1,1—1,2.

Пример расчета. $D_к = 180 \times 10^{-3}$ м, $h_к = 40 \cdot 10^{-3}$ м, $h_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $h_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $\varepsilon = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_3 = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $l_5 = 25 \cdot 10^{-3}$ м, $l_6 = 10 \times 10^{-3}$ м, $a = 20 \cdot 10^{-3}$ м, $K = 81$, $b_и = 0,8 \cdot 10^{-3}$ м, $S_к = 27,6 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{к1} = 5,7 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{к2A} = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{к2B} = 5,1 \cdot 10^{-4}$ м², $n_{max} = 1,2 \cdot 2200 = 2640$ об/мин, $H_г = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $D_г = 95 \cdot 10^{-3}$ м.

Из (9-118)

$$p_0 = \left[60 + 5\left(\frac{2640}{1000} \frac{18}{10}\right)^{3/2}\right] \cdot 10^5 = 11,2 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Сечение $I—I$:
из (9-117)

$$F_{к1} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 492 \text{ Н};$$

$$b_{к1} = \frac{\pi(180 - 20 - 6) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 5,18 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

масса консольной части

$$m_{к1} = 8900 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot 5,18 \cdot 10^{-3} = 26,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

радиус инерции консольной части

$$R_{01} = \frac{(180 - 20 - 6) \cdot 10^{-3}}{2} = 77 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

центробежная сила по (9-116)

$$C_{к1} = 11 \cdot 26,2 \cdot 10^{-3} \cdot 77 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000}\right)^2 \times 10^3 = 155 \text{ Н};$$

напряжение изгиба по (9-115)

$$\sigma_{к1} = \frac{3}{2} \frac{30 \cdot 10^{-3}(155 + 492)}{5,18 \cdot 10^{-3} \cdot (20 - 6)^2 \cdot 10^{-6}} = 28,6 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Сечение $II—II$ (с учетом петушков, рис. 9-58):

$$F_{к2} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 (1,8 + 5,1) \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 600 \text{ Н};$$

центробежную силу определяем для двух участков консольной части (A и B на рис. 9-58):

$$m_{к2A} = 8900 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} \cdot 5,18 \cdot 10^{-3} = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$C_{к2A} = 11 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 77 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000}\right)^2 \times 10^3 = 49 \text{ Н};$$

$$m_{к2B} = 8900 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4} \cdot 5,18 \cdot 10^{-3} = 23,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$C_{к2B} = 11 \cdot 23,4 \cdot 10^{-3} \cdot 88 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000}\right)^2 \times 10^3 = 158 \text{ Н},$$

где $R_{02B} = 88 \cdot 10^{-3}$ м — радиус центра тяжести петушков;
напряжение изгиба по (9-115)

$$\sigma_{к2} = \frac{3}{2} \frac{25 \cdot 10^{-3} \cdot [(49 + 158) + 600]}{5,18 \cdot 10^{-3}(20 - 6)^2 \cdot 10^{-6}} = 29,8 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Сечение $III—III$:
из (9-117)

$$F_{р.х} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 \cdot 27,6 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{81} = 2400 \text{ Н};$$

$$b_{к.ср} = \frac{\pi(180 - 40) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 4,63 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$m_{к.п} = 8900 \cdot 27,6 \cdot 10^{-4} \cdot 4,63 \cdot 10^{-3} = 98,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

$$R_{0к} = \frac{(180 - 40) \cdot 10^{-3}}{2} = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

центробежная сила по (9-116)

$$C_х = 11 \cdot 98,5 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \left(\frac{2640}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 530 \text{ Н};$$

$$b_{к.х} = \frac{\pi(180 - 2 \cdot 20 - 20) \cdot 10^{-3}}{81} - 0,8 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\sigma_х = \frac{3(530 + 2400) \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 16^2 \cdot 10^{-6}} = 86 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

напряжение сжатия в манжетах по (9-120)

$$\sigma_м = \frac{530 + 2400}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}/2} = 21 \cdot 10^6 < 50 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

напряжение на срез резьбы гайки по (9-122)

$$\sigma_г = \frac{(530 + 2400) \cdot 81 \cdot 1/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 95 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 23 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

а) Механический расчет коллектора на пластмассе

При механическом расчете коллектора на пластмассе определяют напряжение в кольце из пластмассы, удерживающем пластину. Давление на кольцевой выступ пласт-

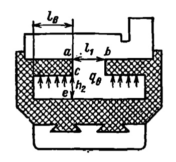


Рис. 9-59. К расчету коллектора на пластмассе.

массового кольца, Па (рис. 9-59), определяется по формуле

$$q_в = \left[\frac{b_и \gamma_и}{2f - \alpha_м} \frac{2m^2}{D_0} + \frac{1}{1 - k_{з,м}} (S_{пл} \gamma_{пл} + S_к \gamma_м k_{з,м}) \times \frac{E_и}{E_{пл} S_{пр}} (m^2 - 1) + \gamma_м k_{з,м}\right] \times \frac{2{,}76 S_к D_0}{l_в} \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \quad (9\text{-}123)$$

где $b_и$ — толщина миканитовой прокладки, м;

$\gamma_и = 2000$ кг/м³; $\gamma_{пл} = 1800$ кг/м³; $\gamma_м = 8900$ кг/м³ — плотности миканита, пластмассы и меди;

D_0 — диаметр окружности по центру тяжести коллекторных пластин, м;

f — коэффициент трения меди по миканиту: $f = 0{,}05$;

$\alpha_м = 2b_и/D_0$ — радианная мера толщины прокладок, рад;

$S_{пл}$ — площадь поперечного сечения пластмассового кольца, м²;

$S_к$ — боковая площадь коллекторной пластины, м²;

$S_{пр}$ — приведенная площадь пластмассового кольца с учетом стальных колец, м²:

$$S_{пр} = S_{пл} + 2 \frac{E_{ст}}{E_{пл}} S_{ст};$$

$S_{ст}$ — площадь поперечного сечения армирующего кольца, м²;

$E_и = 0{,}02 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{пл} = 0{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{ст} = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па — модули упругости миканита, пластмассы и стали;

m — коэффициент, равный отношению испытательной частоты вращения коллектора к максимальной частоте вращения якоря n_{max}, принимают $m = 1{,}8$;

$k_{з,м}$ — коэффициент заполнения коллектора медью:

$$k_{з,м} = 1 - \frac{K b_и}{\pi (D_к - h_к)};$$

$l_в$ — ширина кольцевого выступа, м.

Напряжение растяжения всего пластмассового кольца, вызванное радиальной деформацией, Па,

$$\sigma_{пл} = \frac{q_в l_в D_0}{S_{пр}}. \quad (9\text{-}124)$$

Предел прочности при растяжении составляет 20 МПа для пластмассы К6 и 80 МПа для пластмассы АГ-4.

Прочность коллекторных пластин проверяется на напряжение в них от арочного распора F и центробежной силы C.

Консольные части пластин проверяют, так же как и в предыдущем случае, по (9-115). Кроме того, проверяется напряжение в сечениях a—b и c—e (рис. 9-59).

Напряжение растяжения пластины в сечении a—b, Па,

$$\sigma = \frac{F_1 + C_1}{b_{к1} l_1}, \quad (9\text{-}125)$$

где $b_{к1}$, l_1 — толщина коллекторной пластины в сечении a—b и длина хвостовой части пластины в этом сечении, м.

Силы C_1 и F_1 определяют по (9-116) и (9-117) соответственно для части пластины, расположенной выше линии ab.

Напряжение среза в сечении c—e, Па,

$$\tau = \frac{F_x + C_x}{2 b_{к2} h_2}, \quad (9\text{-}126)$$

где $b_{к2}$, h_2 — средняя толщина и высота пластины в сечении c—e, м.

Силы C_x и F_x определяют для всей пластины.

Среднее давление между пластинами, Па, обеспечивающее необхо-

димый арочный распор, определяют по формуле

$$p_0 = \left\{ \frac{b_п \gamma_п}{2f - \alpha_м} + \frac{1}{1 - k_{з.м}} [S_{пл} \gamma_{пл} + S_к \gamma_м k_{з.м} + S_п \gamma_п (1 - k_{з.м})] \times \frac{D_0 E_п}{2E_{пл} S_{пр}} \right\} 5{,}5 D_0 \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3. \quad (9\text{-}127)$$

Пример расчета. $D_п = 125 \times 10^{-3}$ м, $h_к = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $b_п = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ м, $S_к = 17{,}8 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{пл} = 13 \cdot 10^{-4}$ м², $S_{ст} = 0{,}05 \cdot 10^{-4}$ м², $K = 93$, $D_0 = 102 \cdot 10^{-3}$ м, $l_b = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $m = 1{,}8$, $n_{max} = 1{,}2 \times 3000$ об/мин, $h_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

Коэффициент заполнения коллектора медью

$$k_{з.м} = 1 - \frac{93 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}}{\pi (125 - 30) \cdot 10^3} = 0{,}75.$$

Приведенная площадь пластмассового кольца

$$S_{пр} = 13 \cdot 10^{-4} + 2 \frac{2{,}1 \cdot 10^{11}}{0{,}1 \cdot 10^{11}} \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-4} = 15{,}1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Из (9-123)

$$q_в = \left[\frac{0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}05 - \frac{2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}}{102 \cdot 10^{-3}}} \frac{2 \cdot 1{,}8^2}{102 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{1 - 0{,}75} (13 \cdot 10^{-4} \cdot 1800 + 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 8900 \cdot 0{,}75) \frac{0{,}02 \cdot 10^{11} (1{,}8^2 - 1)}{0{,}1 \cdot 10^{11} \cdot 15{,}1 \cdot 10^{-4}} + 8900 \cdot 0{,}75 \right] \frac{2{,}76 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 102 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 10^{-3}} \times \left(\frac{1{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 3000}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 36 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Из (9-124)

$$\sigma_{пл} = \frac{36 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 102 \cdot 10^{-3}}{15{,}1 \cdot 10^{-4}} = 36{,}6 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Давление между пластинами по (9-127)

$$p_0 = \left\{ \frac{0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}05 - \frac{2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}}{102 \cdot 10^{-3}}} + \frac{1}{1 - 0{,}75} [13 \cdot 10^{-4} \cdot 1800 + 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 8900 \cdot 0{,}75 + 17{,}8 \cdot 10^{-4} \times 2000 (1 - 0{,}75)] \cdot \frac{102 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}02 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{11} \cdot 15{,}1 \cdot 10^{-4}} \right\} \times 5{,}5 \cdot 102 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 3000}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 10{,}7 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Из (9-117)

$$F_x = 2 \cdot 107 \cdot 10^6 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{93} = 1290 \text{ Н}.$$

Средняя толщина коллекторной пластины

$$b_{к0} = \frac{\pi (125 - 30) \cdot 10^{-3}}{93} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 2{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Средняя толщина пластины в сечении c—e (рис. 9-59)

$$b_{к2} = \frac{\pi (1{,}25 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3})}{93} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}36 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Масса пластины

$$m_к = 8900 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-3} = 38 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Из (9-116)

$$C_x = 11 \cdot 38 \cdot 10^{-3} \frac{102}{2} \times 10^{-3} \left(\frac{1{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 3000}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 895 \text{ Н}.$$

Напряжение среза в сечении c—e по (9-126)

$$\tau = \frac{1290 + 895}{2 \cdot 1{,}36 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 100 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

9-9. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Контактные кольца применяют в синхронных машинах и асинхронных двигателях с фазным ротором. Они располагаются на валу машины и к ним подсоединяют обмотку ротора. У синхронных машин устанавливают два кольца, а у асинхронных — три. К контактным кольцам синхронных машин через неподвижные щетки подсоединяют источник питания для обмотки возбуждения, а в асинхронных двигателях — пусковой или регулировочный реостат. Контактные кольца располагают или между магнитопроводом ротора и подшипниковым щитом, или выносят за подшипниковый щит. В настоящее время наиболее часто применяют последнюю

конструкцию, так как в этом случае можно выполнять оба подшипниковых щита одинаковыми, кроме того, устраняется опасность попадания на обмотки щеточной пыли.

Материалом для колец служат сталь, чугун, латунь или медь. На рис. 6-5 была показана конструкция узла контактных колец для асинхронного двигателя серии 4А. Диаметр контактных колец выбран

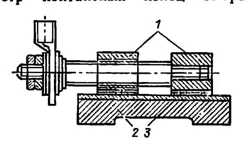


Рис. 9-60. Контактные кольца на втулке.

меньше внешнего диаметра подшипника, что дает возможность при разборке машины снимать подшипниковый щит без предварительного съема колец. На рис. 7-2 была приведена конструкция узла колец для синхронных двигателей СДН2.

У машин относительно небольшой мощности контактные кольца *1* в холодном или горячем состоянии напрессовывают на втулку *2*, расположенную на валу (рис. 9-60). Для изоляции колец от втулки применяют наложенный в несколько слоев формовочный миканит *3* толщиной 0,5—0,7 мм. При наружном диаметре до 100 мм контактные кольца иногда выполняют на пластмассе.

Для машин большой мощности применяют кольца с болтовым креплением (рис. 9-61). Контактные кольца *1* изолированы друг от друга и от болтов *3* изоляционными трубками *2*. Весь узел прикрепляют к торцу вала *4*. Эта конструкция имеет сравнительно небольшую массу, хорошее охлаждение колец, но она менее надежна в отношении прочности крепления и биения.

Механический расчет контактных колец производят с целью определения напряжения в них от действия центробежной силы. Расчет производится для колец после их предельного износа. Предельный диаметральный износ принимают: 8 мм для колец диаметром до 100 мм, 12 мм для диаметров 100—250 мм и 16 мм для диаметров свыше 250 мм.

Центробежная сила кольца, Н,

$$C_к = 11 m_к R_к \left(\frac{n_{max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \qquad (9\text{-}128)$$

где $m_к$ — масса кольца, кг;
$R_к$ — средний радиус кольца, м;
n_{max} — максимальная частота вращения, об/мин.

Напряжение на растяжение в опасном сечении (сечение кольца, ослабленное отверстием для контактной шпильки), Па,

$$\sigma = \frac{C_к}{2\pi S_к}, \qquad (9\text{-}129)$$

где $S_к$ — площадь сечения кольца, м²:

$$S_к = \left(\frac{D_{из} - D_в}{2} - d_0\right) b_к;$$

$D_{из}$ — внешний диаметр кольца после износа, м;

$D_в$, d_0 — внутренний диаметр кольца и диаметр отверстия под шпильку, м;

$b_к$ — ширина кольца, м.

Напряжения в контактных кольцах, напрессованных на втулку, должны быть рассчитаны с учетом натяга при прессовой посадке по (9-97). Допускаемые напряжения не должны превышать 150 МПа для стальных колец и 75 МПа для латунных.

9-10. ТОКОСЪЕМНЫЙ АППАРАТ

Токосъемный аппарат, предназначенный для съема тока с коллектора или с контактных колец, состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и траверсы. На рис. 9-62 показаны некоторые из возможных конструкций щеткодержателей.

Щетки для электрических машин прессуются из угольных и графитных порошков. Электрические свойства щеток и стандартизованные их размеры приведены в приложении IV. Для отвода тока в щетки заделываются гибкие плетеные ка-

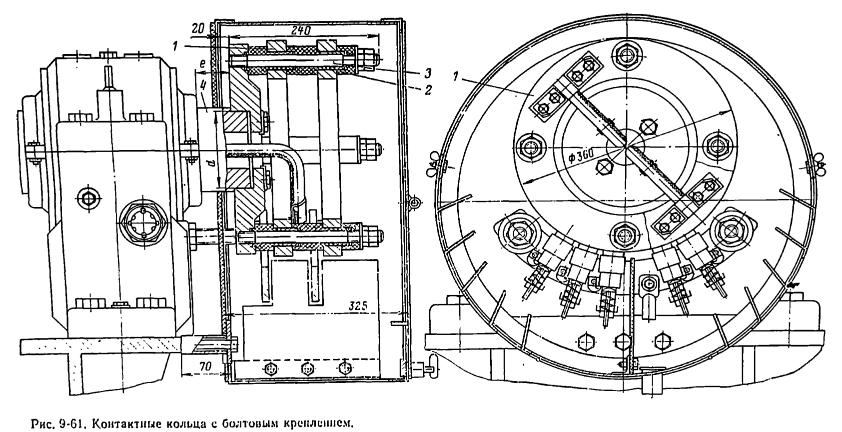


Рис. 9-61. Контактные кольца с болтовым креплением.

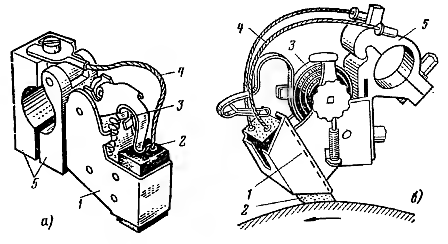


Рис. 9-62. Щеткодержатели машин постоянного тока.

а — радиальный; *б* — реактивный.

натики *4*, которые вторыми своими концами посредством припаянных к ним наконечников присоединяют к неподвижной части щеткодержателя. Щетки *2* устанавливают в обойму щеткодержателя *1*. Щеткодержатели выполняют из латуни литыми и штампованными. Для того чтобы

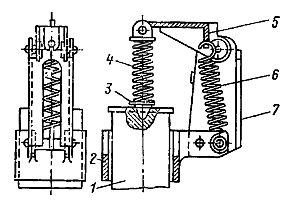


Рис. 9-63. Радиальный щеткодержатель.

1 — щетка; *2* — щеткодержатель; *3* — фарфоровый наконечник; *4* — пружина; *5* — рычаг; *6* — нажимная пружина; *7* — корпус щеткодержателя.

осуществить плотный контакт с коллектором или контактными кольцами, на щетки с помощью пружины *3* осуществляется давление, которое выбирается равным 0,02—0,04 МПа. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах с помощью колодок *5*. На щеточном пальце обычно размещают несколько щеткодержателей. Наиболее распространенным видом щеткодержателей являются радиальные (рис. 9-62, *а*), у них направление щетки совпадает с продолжением радиуса коллектора. Такие щеткодержатели применяют для реверсивных машин, так как условия работы щеток не зависят от направления вращения. На рис. 9-63 показана еще одна конструкция радиального щеткодержателя.

Для машин одностороннего вращения чаще находят применение ре-

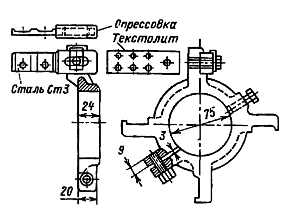


Рис. 9-64. Траверса.

активные щеткодержатели (рис. 9-62, *б*), достоинство которых заключается в том, что при определенном нажиме и угле наклона щетка не упирается в обойму и скользит в ней без трения.

В машинах постоянного тока щеточные пальцы крепят к траверсе, являющейся несущей конструкцией всего узла токосъема. Траверса должна иметь возможность перемещения по окружности с целью установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. На рис. 9-64 показана одна из возможных конструкций травер-

сы, которая применяется для машин относительно небольших мощностей. Траверсу закрепляют на специальной заточке подшипникового щита стяжными и стопорными болтами.

Пальцы, на которых укрепляют щеткодержатели, представляют собою цилиндрические или призматические стержни. Второе исполнение встречается чаще, так как оно проще в производстве и лучше фиксирует положение щеток. Призматические пальцы выполняют либо из гетинакса или текстолита, либо из полосы стали, опрессованной в месте крепления с траверсой. Цилиндрические пальцы изолируют от траверсы миканитовыми втулками и шайбами или опрессовывают пластмассой. Число пальцев в машине обычно равно числу полюсов. Щеточные пальцы одинаковой полярности соединяют между собой медными шинами или проводами.

Щеткодержатели асинхронных и синхронных машин сидят на изолированной части пальца, металлический конец которого запрессован или ввинчен в прилив подшипникового щита.

Иногда у машин постоянного тока применяется также крепление щеточных пальцев непосредственно к подшипниковому щиту. Такое крепление пальцев принято, например, у машин серии 2П с высотой оси вращения $h=355\div500$ мм.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ I

ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА НА ЭВМ

Настоящее приложение содержит следующие программы отдельных этапов расчета электрических машин, разработанные применительно к выполнению учебных проектов:

П1-1. Расчет размеров трапецеидальных пазов статора со всыпной обмоткой.

П1-2. Расчет размеров грушевидных пазов короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя.

П1-3. Расчет рабочих характеристик асинхронных двигателей.

П1-4. Расчет пусковых характеристик асинхронных двигателей с грушевидными или овальными пазами на роторе.

П1-5. Расчет коэффициентов k_r и $k_д$ для стержней обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя

П1-6. Расчет магнитной цепи и характеристики холостого хода синхронных машин и машин постоянного тока.

Первые четыре программы (§ П1-1—П1-4), требующие для своей реализации меньший объем машинной памяти, чем остальные, составлены для малых ЭВМ типа «Электроника-С50», которые в последнее время находят все большее распространение. При предварительной записи программ на магнитную пленку расчет на этих машинах не требует специальной подготовки и может быть выполнен в часы, отведенные для консультаций учебных проектов. Программы предусматривают форму общения с ЭВМ в виде диалога «человек—машина». Это позволяет, критически оценив результаты расчета первого варианта, скорректировать исходные данные и тут же повторить расчет и получить новые результаты. Такая возможность при выполнении учебных проектов способствует более полному уяснению взаимных связей размерных соотношений в электрической машине и расчетных величин, например взаимной зависимости размеров пазов, индукций в зубцах и ярме и коэффициента заполнения паза и т. п.

Для расчетов, требующих большого объема машинной памяти (§ П1-5 и П1-6), приведены программы для ЭВМ «Минск-32». Работа на этих машинах обычно выполняется на вычислительных центрах.

Программы составлены инженерами кафедры электрических машин МЭИ В. А. Поповым (§ П1-1—П1-4), В. Г. Фисенко (§ П1-5) и А. В. Кирилловым (§ П1-6).

Алгоритмы всех программ базируются на расчетных формулах, имеющихся в соответствующих разделах книги. Ниже приводятся описания и тексты программ.

П1-1. Расчет размеров трапецеидальных пазов статора со всыпной обмоткой (для ЭВМ «Электроника-С50»)

Описание и порядок обращения к программе

Трапецеидальные пазы статора (см. рис. 6-19, *а*) выполняются в асинхронных двигателях и синхронных машинах, имеющих всыпную обмотку. Основная задача расчета заключается в определении таких размеров паза ($h_п$, b_1 и b_2), при которых будут соблюдаться следующие условия:

зубцы статора имеют параллельные боковые грани;

индукции в зубцах B_z и в ярме статора B_a находятся в заданных пределах;

коэффициент заполнения паза $k_з$ соответствует заданному значению.

Необходимые для расчета исходные данные, полученные или выбранные на предыдущих этапах расчета, перечислены в табл. П-1.

Алгоритм программы базируется на расчетных формулах § 6-5 и учитывает специфику заполнения пазов статора с однослойной и двухслойной обмотками (принято, что двигатели с $h \leqslant 160$ мм имеют однослойную обмотку, с $h \geqslant 180$ мм — двухслойную). Угол наклона клиновой части паза принят 45° для двигателей с $h \leqslant 250$ мм и 30° для двигателей с $h \geqslant 280$.

Обозначения размеров паза и зубца в табл. П-1 соответствуют рис. 6-19, *а*.

Для ввода исходных данных нажимают клавиши ∇ и S, при этом на регистре *У* (Рг*У*) высветится цифра 1, а регистр *X* (Рг*X*) будет погашен. Далее последовательно набирают исходные данные в порядке их расположения в табл. П-1, нажимая клавишу S после ввода каждой из величин. Номер вводимой величины высвечивается на Рг*У*; он должен соответствовать ее порядковому номеру в табл. П-1. После ввода последней из величин и нажатия клавиши S машина начинает счет.

Таблица П-1

Последовательность ввода исходных данных для расчета размеров пазов статора

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
1	D	мм	1.00000000000
2	z_1	—	2.00000000000
3	h	мм	3.00000000000
4	$d_{из}$	мм	4.00000000000
5	D_a	мм	5.00000000000
6	$u_{п1}n_{эл}$	—	6.00000000000
7	$b_ш$	мм	7.00000000000
8	$h_ш$	мм	8.00000000000
9	$b_{из}$	мм	9.00000000000
10	$\Delta h_п$	мм	10.00000000000
11	$\Delta b_п$	мм	11.00000000000
12	Φ	Вб	12.00000000000
13	l_1	мм	13.00000000000
14	$B_б$	Тл	14.00000000000
15	$k_з$	—	15.00000000000
16	B_{z1}	Тл	16.00000000000

Примечания: 1. К п. 6: $u_{п1}$ $n_{эл}$— общее число элементарных проводников в одном пазу.
2. К пп. 10 и 11: $\Delta h_п$ и $\Delta b_п$ — припуски по высоте и ширине паза на штамповку и шихтовку сердечника (см. § 6-5).

По окончании счета в РгУ высвечивается номер регистра памяти первой искомой величины, указанной в табл. П-2, а в РгХ— ее значение. Значения второй и следующих искомых величин (в порядке их расположения в табл. П-2) высвечиваются в РгХ после последующих нажатий клавиши S; одновременно для каждой из величин в РгУ высвечивается номер ее регистра памяти, указанный в табл. П-2.

Таблица П-2

Последовательность вывода результатов расчета размеров паза статора на регистр X

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
1	B_a	Тл	17.0000000000
2	b_1	мм	18.0000000000
3	b_2	мм	19.0000000000
4	$h_п$	мм	20.0000000000
	$S''_п$	мм²	21.0000000000
5			
6	$S'_п$	мм²	22.0000000000
7	h_a	мм	23.0000000000
8	b_{z1}	мм	24.0000000000

Примечания: 1. К пп. 2—4: размеры паза b_1, b_2 и $h_п$— по рис. 6-19, *а*.
2. К пп. 5 и 6: $S''_п$ и $S'_п$ — площади поперечного сечения паза «в свету» и поперечного сечения паза, занимаемого обмоткой.

Если полученное значение B_a не соответствует допустимому, то следует несколько изменить исходные данные, например B_z или $d_{из}$, $k_з$, и повторить расчет. Для изменения значений тех или иных исходных данных нужно набрать в РгХ новое значение измененной величины, нажать клавишу ЗП и номер регистра памяти, соответствующий данной величине по табл. П-1.

Расчет по измененным данным машина начинает после набора кода 02 01 (нажатия клавиш 20 и 01).

Для проверки правильности введения исходных данных нажимают клавиши 0 и ↑, после чего набирают код 03 02 (клавиши 30 и 02), при этом в РгУ высвечивается номер регистра памяти первой исходной величины (см. табл. П-1), а в РгХ — ее значение. Остальные исходные величины в порядке их расположения в табл. П-1 высвечиваются после последующих нажатий клавиши S. После операции проверки счет начинается набором кода 02 01.

Текст программы расчета размеров трапецеидальных пазов статора

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
000	04 08	001	05 14	002	07 01	003	05 04
001	04 03	005	02 02	006	07 15	007	05 15
003	05 04	003	07 01	010	06 00	011	07 01
012	07 07	013	05 09	014	04 07	015	02 02
016	04 03	017	02 01	018	04 15	019	00 05
020	04 05	021	00 01	022	07 13	023	06 02
024	04 05	025	00 15	026	06 03	027	02 08
028	04 14	029	02 02	030	04 15	031	00 01
032	06 03	033	06 02	034	01 05	035	00 14
035	06 02	037	04 05	038	00 02	039	06 03
040	04 05	041	01 05	012	06 03	043	07 12
044	07 03	045	07 07	046	06 03	047	02 08
048	04 14	049	02 04	050	04 15	051	00 08
052	07 02	053	06 02	054	04 05	055	00 07
056	06 01	037	04 14	058	00 00	059	04 05
050	00 01	061	03 05	062	07 11	063	04 04
064	12 00	055	07 11	066	06 06	067	05 00
068	04 00	069	12 00	070	04 14	071	01 09
072	06 06	073	05 09	074	06 02	075	04 02
076	01 09	077	04 14	078	02 06	079	04 15
080	00 02	031	04 05	082	02 04	083	04 04
034	02 07	035	04 04	086	02 08	057	07 11
038	04 04	039	02 00	090	07 11	091	06 06
092	06 02	093	06 06	094	04 01	095	01 09
096	04 15	097	00 03	098	07 02	099	07 08
100	07 00	101	05 07	102	04 07	103	02 03
104	06 09	105	06 01	105	07 03	107	06 12
108	07 11	109	06 03	110	04 05	111	00 02
112	06 00	113	06 05	114	04 03	115	01 09
116	02 01	117	01 03	118	02 03	119	01 15
120	00 02	121	06 09	122	06 01	123	06 05
124	04 03	125	01 09	126	04 09	127	02 01
128	01 15	129	01 09	130	02 08	131	04 14
132	01 09	133	06 05	134	04 00	135	00 00
136	04 01	137	12 00	138	04 00	139	02 09
140	04 01	141	02 07	142	04 01	143	02 08
144	04 15	145	00 10	146	07 02	147	06 02
148	06 06	149	01 01	150	12 00	151	04 00
152	06 00	153	04 05	154	00 11	155	06 02
156	06 05	157	04 01	158	02 09	159	04 00
160	02 07	161	04 05	162	00 02	163	04 02
164	02 07	165	04 02	166	02 08	167	04 05
168	02 06	169	04 01	170	02 07	171	04 01
172	02 08	173	04 15	174	00 09	175	07 04
176	06 02	177	06 05	178	04 01	179	02 09
180	04 02	181	02 08	152	04 00	183	12 00
184	04 15	185	00 02	186	07 02	187	06 02
188	06 05	159	04 02	190	02 09	191	06 09
192	06 02	193	06 06	194	04 02	195	12 00
196	07 04	197	06 02	198	04 14	199	03 00
200	06 04	201	04 05	202	00 02	203	06 02
204	04 05	205	02 02	206	06 02	207	06 05
208	07 11	209	04 04	210	03 02	211	04 15
212	00 03	213	07 02	214	07 08	215	07 00
216	05 07	217	04 07	218	02 06	219	04 15
220	12 00	221	06 09	222	03 03	223	07 02

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
224	06 03	225	04 05	226	01 09	227	06 00
228	04 01	229	00 00	230	04 05	231	00 07
232	06 01	233	04 00	234	00 00	235	07 03
236	06 12	237	06 02	238	04 02	239	00 00
240	04 02	241	03 00	242	04 02	243	02 09
244	04 02	245	02 08	246	04 02	247	03 02
248	06 09	249	06 02	250	07 02	251	06 02
252	04 05	253	01 09	254	06 01	255	04 00
256	00 00	257	04 05	258	00 07	259	06 00
260	04 01	261	00 00	262	04 14	263	12 00
264	04 08	265	02 06	266	04 15	267	02 07
268	04 05	269	00 00	270	06 02	271	04 05
272	02 08	273	06 00	274	05 05	275	04 00
276	03 02	277	04 15	278	12 00	279	04 05
280	02 09	281	06 00	282	04 14	283	02 06
284	04 16	285	00 03	286	07 01	287	07 06
288	07 01	289	05 07	290	04 07	291	02 07
292	07 02	293	07 05	294	07 01	295	05 07
296	04 07	297	02 09	298	06 09	299	06 04
300	07 12	301	07 06	302	06 02	303	04 05
304	00 02	305	06 03	306	06 05	307	04 01
308	02 06	309	03 00	310	07 12	311	07 06
312	04 02	313	12 00	314	04 15	315	01 09
316	06 02	317	06 05	318	04 00	319	12 00
320	04 05	321	00 00	322	04 01	323	03 02
324	02 07	325	04 08	326	02 09	327	06 09
328	06 04	329	07 12	330	07 08	331	06 02
332	04 05	333	00 02	334	06 03	335	06 05
336	04 01	337	02 06	338	03 00	339	07 12
340	07 04	341	04 02	342	12 00	343	04 15
344	01 09	345	07 12	346	07 09	347	06 02
348	06 05	349	04 00	350	12 00	351	04 05
352	12 00	353	04 01	354	03 02	355	02 07
356	04 08	357	03 00	358	04 16	359	00 01
360	06 09	361	06 02	362	04 14	363	12 00
364	04 15	365	01 09	356	04 05	367	00 02
368	06 02	369	06 05	370	04 01	371	12 00
372	04 05	373	00 02	374	04 03	375	12 00
376	05 11	377	04 08	378	02 07	379	04 05
380	02 06	381	07 13	382	04 04	383	00 00
384	04 15	385	03 02	386	07 04	387	06 02
388	04 05	389	03 00	390	06 02	391	04 05
392	00 00	393	06 06	394	06 01	395	04 12
396	04 10	397	07 00	398	05 15	399	06 05
400	06 12	401	04 04	402	00 00	403	04 05
404	02 06	405	07 11	406	06 04	407	04 05
408	00 00	409	06 00	410	04 05	411	03 00
412	06 03	413	07 02	414	06 03	415	02 09
416	04 14	417	02 00	418	04 14	419	02 01
420	07 02	421	06 02	422	04 14	423	03 03
424	04 05	425	00 01	426	06 00	427	06 09
428	06 02	429	04 05	430	00 02	431	06 03
432	04 05	433	02 04	434	06 01	435	02 08
436	04 14	437	01 08	438	06 05	439	04 00
440	03 03	441	04 05	442	01 09	443	04 00
444	03 03	445	06 00	446	07 02	447	06 03
448	04 05	449	00 11	450	06 01	451	04 14
452	12 00	453	04 15	464	01 09	455	04 05
456	00 07	467	06 01	458	07 02	459	06 03
460	04 05	461	00 10	462	06 00	463	04 05
464	00 08	465	06 00	466	06 05	467	04 01
468	02 01	469	04 05	470	12 00	471	04 15
472	02 01	473	06 02	474	02 08	475	04 14
476	02 01	477	04 15	478	00 05	479	04 05
480	00 01	481	06 01	482	07 02	483	06 03
484	04 05	485	02 00	486	06 01	487	02 08
488	04 14	489	02 03	490	04 05	491	00 13
492	06 02	493	07 02	494	06 02	495	04 05
496	00 12	497	04 12	498	07 06	499	06 06
500	06 03	501	02 08	502	04 14	503	01 07
504	07 01	505	07 06	506	06 04	507	04 08
508	03 02	509	07 01	510	06 00	511	05 05
512	05 15	513	07 02	514	07 04	515	05 09
516	04 07	517	03 02	518	05 15	519	04 08
520	02 08	521	06 05	522	06 08	523	04 04
524	02 05	525	06 01	526	07 01	527	07 00
528	07 00	629	06 02	530	06 06	531	06 08
532	04 12	583	04 02	534	04 00	535	02 05
536	04 12	587	07 02	538	06 01	539	07 12
540	07 05	541	05 07	542	04 07	543	03 01

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
544	07 12	545	07 00	546	07 01	547	04 15
548	02 05	549	06 00	550	05 11	551	04 08
552	03 01	553	04 16	554	02 06	555	05 11
556	05 12						

Контрольная сумма кодов программы — 5354.

П I-2. Расчет размеров грушевидных пазов короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя (для ЭВМ «Электроника-С50»)

Описание и порядок обращения к программе

Задача расчета состоит в определении размеров паза ротора (см. рис. 6-27) b_1, b_2 и h_1, при которых соблюдаются следующие условия:

зубцы ротора имеют параллельные боковые грани;

плотность тока в стержне J_c и индукции в зубцах B_{z2} и ярме B_j ротора не превышают допустимых пределов (см. табл. 6-10);

диаметр закругления нижней части паза $b_2 \geqslant 2$ мм в двигателях с $h \leqslant 132$ мм и $b_2 \geqslant 4$ мм в двигателях с $h \geqslant 160$ мм.

Алгоритм программы основан на расчетных формулах, приведенных в § 6-7.

Расчет рекомендуется начинать, задаваясь пониженной плотностью тока в стержне и средней индукцией в зубцах. Наибольшие допустимые значения $J_{c\,max}$, $B_{z2\,max}$ и $B_{j\,max}$ должны быть заданы по верхним пределам, определенным в табл. 6-10.

Если при заданных J_c и B_{z2} в результате расчета окажется, что значения b_2 меньше или B_j больше допустимых, то программой предусмотрено автоматическое повторение циклов расчета при постепенном увеличении J_c (с шагом 0,1 А/мм^2) до $J_{c\,max}$. Если и при этом значения b_2 или B_j не будут соответствовать допустимым, то циклы повторяются при постепенном увеличении индукции в зубцах до $B_{z2\,max}$ (с шагом 0,01 Тл). Расчет заканчивается при получении допустимых значений b_2 и B_j.

Для ввода исходных данных набирают код 02 00 (клавиши 20 и 00), при этом в РгУ высвечивается цифра 1, РгХ погашен. Далее вводят исходные данные в последовательности их размещения на табл. П-3, нажимая клавишу S после набора каждой величины.

Вывод первого результата расчета (табл. П-4) происходит автоматически, после окончания счета.

Остальные результаты в порядке их положения в табл. П-4 выводятся на РгХ последовательным нажатием клавиши S, как описано в § П I-1.

Если в результате расчета b_2 и B_j не будут соответствовать допустимым, в РгУ

Таблица П-3

Последовательность ввода исходных данных для расчета размеров пазов ротора

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
1	h	мм	1.00000000000
2	$2p$	—	2.00000000000
3	D_2	мм	3.00000000000
4	D_j	мм	4.00000000000
5	l_2	мм	5.00000000000
6	Z_2	—	6.00000000000
7	$h'_ш$	мм	7.00000000000
8	$h_ш$	мм	8.00000000000
9	$m_{к2}\ d_{к2}$	—	9.00000000000
10	Φ	Вб	10.0000000000
11	B_δ	Тл	11.0000000000
12	I_c	А	12.0000000000
13	$B_{z2\,max}$	Тл	13.0000000000
14	$J_{c\,max}$	А/мм²	14.0000000000
15	$B_{j\,max}$	Тл	15.0000000000
16	B_{z2}	Тл	16.0000000000
17	J_c	А/мм²	17.0000000000

Примечания: 1. К пп. 7 и 8: размеры $h'_ш$ и $h_ш$ — по рис. 6-27, *б*. Для полузакрытых пазов задавать $h'_ш = 0$.

2. К п. 9: при отсутствии аксиальных каналов в магнитопроводе ротора задавать $m_{к2}d_{к2}=0$.

Таблица П-4

Последовательность вывода результатов расчета размеров пазов ротора на регистр X

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
1	h_1	мм	18.0000000000
2	b_1	мм	19.0000000000
3	b_2	мм	20.0000000000
4	$h_п$	мм	21.0000000000
5	h_j	мм	22.0000000000
6	B_j	Тл	23.0000000000
7	B_{z2}	Тл	24.0000000000
8	J_c	А/мм²	25.0000000000
9	b_{z2}	мм	26.0000000000
10	q_s	мм²	27.0000000000

Примечание. Размеры паза h_1, b_1, b_2 и $h_п$ (пп. 1—4) — по рис. 6-27.

и РгX в течение 1—2 с будет высвечиваться цифра 111, после чего в РгX появится первая искомая величина (табл. П-4), соответствующая $B_{z2}=B_{z2\,max}$ и $J_c=J_{c\,max}$.

Проверка правильности введения исходных данных или их изменения осуществляется, как описано в § П1-1.

Текст программы расчета размеров грушевидных пазов ротора

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
000	04 08	001	02 00	002	07 01	003	06 04
004	04 08	005	07 01	006	07 15	007	05 15
008	05 04	009	07 01	010	06 00	011	07 01
012	07 08	013	05 09	014	04 07	015	07 01
016	04 08	017	02 01	018	04 05	019	01 05
020	04 04	021	02 04	022	04 08	023	02 09
024	04 05	025	01 07	026	04 04	027	02 05
028	04 08	029	02 02	030	04 15	031	00 12
032	04 05	033	02 05	034	06 03	035	03 00
036	04 14	037	02 07	038	04 15	039	00 03
040	06 09	041	06 02	042	04 05	043	00 06
044	06 03	045	03 00	046	04 05	047	00 11
048	06 02	049	04 05	050	02 04	051	06 03
052	07 12	053	07 09	054	07 07	055	06 03
056	03 00	057	04 14	058	02 05	059	04 05
060	00 05	061	06 02	062	04 14	063	01 09
064	04 15	065	00 07	066	07 02	067	06 02
068	04 05	069	00 08	070	05 00	071	06 00
072	04 05	073	00 03	074	06 05	075	06 01
076	06 09	077	05 02	078	06 05	079	04 01
080	01 09	081	04 05	082	00 05	083	06 00
084	07 02	085	06 02	086	05 05	087	07 11
088	04 15	089	01 09	090	06 03	091	03 00
092	04 14	093	01 09	094	04 15	095	00 05
096	06 09	097	06 03	098	04 14	099	12 00
100	06 04	101	07 02	102	06 03	103	05 05
104	04 15	105	12 00	106	04 01	107	12 00
108	05 00	109	04 05	110	01 09	111	07 13
112	06 02	113	04 05	114	02 07	115	05 01
116	04 05	117	12 00	118	06 03	119	06 05
120	04 12	121	04 10	122	06 05	123	07 11
124	06 12	125	05 04	126	03 00	127	04 14
128	02 00	129	04 05	130	01 09	131	06 05
132	06 01	133	04 05	134	00 06	135	06 02
136	06 09	137	06 03	138	03 00	139	04 14
140	01 08	141	04 15	142	00 01	143	07 01
144	07 03	145	07 03	146	05 08	147	04 07
148	02 04	149	04 15	150	02 00	151	07 01
152	05 07	153	04 07	154	02 05	155	02 05
156	04 08	157	02 05	158	07 12	159	07 01
160	04 00	161	02 05	162	04 15	163	02 05
164	04 05	165	00 14	166	06 05	167	05 03
168	04 07	169	02 02	170	02 07	171	04 08
172	02 04	173	04 15	174	02 00	175	07 02
176	05 07	177	04 07	178	02 05	179	04 08
180	02 06	181	04 14	182	02 01	183	04 05
184	01 09	185	04 00	186	02 01	187	06 06
188	06 01	189	04 05	190	00 06	191	06 02
192	06 09	193	06 03	194	03 00	195	04 14
196	01 08	197	06 05	198	04 00	199	02 01
200	04 05	201	00 08	202	04 00	203	02 01
204	04 05	205	00 07	206	04 00	207	02 01
208	04 15	209	00 02	210	07 06	211	05 07
212	04 07	213	02 08	214	04 15	215	00 03
216	04 05	217	00 04	218	06 01	219	07 02
220	06 03	221	04 05	222	02 01	223	06 01
224	04 14	225	12 00	226	04 15	227	00 09
228	07 02	229	06 02	230	07 03	231	05 03
232	04 05	233	12 00	234	06 06	235	06 01
236	03 00	237	04 14	238	02 02	239	03 03
240	04 08	241	02 08	242	04 15	243	00 03
244	07 02	245	06 03	246	04 05	247	02 01
248	06 01	249	07 03	250	07 12	251	07 02
252	06 03	253	04 14	254	12 00	255	04 15
256	00 02	257	07 02	258	06 03	259	06 06
260	06 00	261	06 03	262	05 05	263	04 02
264	12 00	265	04 15	266	00 09	267	07 02
268	06 02	269	07 03	270	06 03	271	04 05
272	12 00	273	06 05	274	06 01	275	03 00
276	04 14	277	02 02	278	04 08	279	03 03
280	04 05	281	00 05	282	06 02	283	07 02
284	06 02	285	07 12	286	07 09	287	07 07
288	06 02	289	04 05	290	00 10	291	04 12
292	07 06	293	06 05	294	06 03	295	03 00
296	04 14	297	02 03	298	04 05	299	00 15
300	06 06	301	05 07	302	04 07	303	02 05
304	03 02	305	04 08	306	02 07	307	07 12
308	07 00	309	07 01	310	04 00	311	02 04
312	04 15	313	02 04	314	04 05	315	00 13

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
316	06 06	317	05 07	318	04 07	319	03 01
320	02 09	321	04 08	322	03 01	323	07 01
324	07 01	325	07 01	326	06 04	327	04 12
328	06 15	329	04 12	330	06 15	331	04 08
332	03 02	333	07 02	334	04 02	335	01 09
336	04 02	337	02 00	338	07 01	339	07 07
340	06 04	341	04 08	342	07 03	343	07 01
344	06 00	345	05 05	346	05 15	347	07 02
348	07 07	349	05 09	350	04 07	351	07 03
352	05 15	353	04 08	354	03 00	355	06 05
356	06 08	357	04 04	358	02 08	359	06 01
360	07 01	361	07 00	362	07 00	363	06 02
364	06 05	365	06 08	366	04 12	367	04 02
368	04 00	369	02 08	370	04 12	371	07 02
372	06 01	373	07 12	374	07 05	375	05 07
376	04 07	377	07 04	378	07 12	379	07 00
380	07 01	381	04 15	382	02 08	383	06 00
384	05 11	385	04 08	386	07 04	387	04 15
388	02 08	389	05 11	390	05 12		

Контрольная сумма кодов программы — 3933.

П1-3. Расчет рабочих характеристик асинхронных двигателей

(для ЭВМ «Электроника-С50»)

Описание и порядок обращения к программе

Программа расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей может быть использована для двигателей как с фазными, так и с короткозамкнутыми роторами. Алгоритм программы соответствует расчетным формулам, приведенным в формуляре расчета (см. табл. 6-26).

Расчет коэффициентов c_1, a, a', b и b' производится по формулам (6-216)—(6-224).

Для ввода исходных данных необходимо нажать клавиши ∇ и 0, при этом на РгY высвечивается цифра 1, РгX погашен. Исходные величины вводятся в последовательности их расположения в табл. П-5. Результаты расчета выводятся на РгX в последовательности их расположения в табл. П-6. Ввод и вывод данных производится так же, как в программах П1-1 и П1-2. После вывода на РгX последней рассчитанной величины при первоначально заданном скольжении нажимается клавиша S, при этом на РгY высвечивается цифра 13 — номер регистра памяти значений скольжения (см. табл. П-5). Далее задают новое значение скольжения и нажимают клавишу S. Расчет повторяется для нового значения скольжения.

Таблица П-5

Последовательность ввода исходных данных для расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгY
1	r_1	Ом	1.00000000000
2	r_2'	Ом	2.00000000000
3	r_{12}	Ом	3.00000000000
4	x_1	Ом	4.00000000000
5	x_2'	Ом	5.00000000000
6	x_{12}	Ом	6.00000000000
7	$U_{1н}$	В	7.00000000000
8	$P_{ст}+P_{мех}$	Вт	8.00000000000
9	$I_{0а}$	А	9.00000000000
10	$I_{0р}=I_{\mu}$	А	10.0000000000
11	$P_{1н}=\frac{P_{2н}}{\eta}$	Вт	11.0000000000
12	$I_{1н}$	А	12.0000000000
13	s	—	13.0000000000

Примечания: 1. К п. 8: $P_{ст}+P_{мех}$ — сумма потерь в стали и механических, принимаемая неизменной при расчете рабочих характеристик.

2. К пп. 11 и 12: η и $I_{1н}$ задавать по принятым в начале расчета двигателя значениям.

Таблица П-6

Последовательность вывода результатов расчета рабочих характеристик на регистр X

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгY
1	I_1	А	14.0000000000
2	η	—	15.0000000000
3	$\cos\varphi$	—	16.0000000000
4	P_1	Вт	17.0000000000
5	I_2'	А	18.0000000000
6	P_2	Вт	19.0000000000

Текст программы расчета рабочих характеристик

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
000	04 08	001	07 00	002	07 01	003	06 04
004	04 08	005	07 12	006	07 15	007	05 15
008	05 04	009	07 01	010	06 00	011	07 01
012	07 04	013	05 09	014	04 07	015	07 12
016	02 00	017	04 08	018	02 01	019	07 01
020	07 03	021	06 04	022	07 15	023	05 15
024	04 04	025	00 13	026	04 08	027	02 00
028	04 15	029	00 01	030	04 14	031	12 00
032	04 05	033	00 03	034	04 04	035	02 01
036	06 00	037	06 02	038	04 14	039	02 00
040	07 13	041	04 04	042	00 00	043	04 16
044	00 04	045	06 06	046	04 02	047	02 01
048	06 06	049	04 05	050	00 06	051	04 02
052	12 00	053	06 00	054	06 02	055	07 13
056	04 00	057	00 00	058	06 06	059	04 00
060	02 00	061	04 05	062	00 00	063	04 03
064	02 00	065	04 05	066	12 00	067	04 01
068	02 01	069	04 05	070	00 00	071	04 03
072	02 01	073	04 05	074	02 01	075	05 14
076	04 04	077	02 01	078	04 05	079	02 00
080	07 13	081	06 04	082	04 05	083	02 01
084	07 13	085	06 01	086	04 14	087	02 03
088	06 00	089	06 00	090	06 06	091	06 12
092	04 04	093	02 02	094	04 15	095	00 01

Продолжение

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
096	04 05	097	02 00	098	06 02	099	04 14
100	02 04	101	04 15	102	00 04	103	06 02
104	04 14	105	02 05	106	04 15	107	02 01
108	06 06	109	06 02	110	04 14	111	02 06
112	04 15	113	00 04	114	06 02	115	06 06
116	04 01	117	02 04	118	04 05	119	00 01
120	06 02	121	06 05	122	04 00	123	02 05
124	07 02	125	04 02	126	02 06	127	04 15
128	02 06	129	04 05	130	00 05	131	06 02
132	06 06	133	04 01	134	02 04	135	04 05
136	02 03	137	06 02	138	06 06	139	04 00
140	02 05	141	04 05	142	00 02	143	06 02
144	04 05	145	00 13	146	06 03	147	04 05
148	02 04	149	06 00	150	04 14	151	02 00
152	04 15	153	02 06	154	04 05	155	00 02
156	06 02	157	04 05	158	00 13	159	06 03
160	04 05	161	02 05	162	06 00	163	04 14
164	02 01	165	04 05	166	02 00	167	07 13
168	06 06	169	07 13	170	05 00	171	06 05
172	06 12	173	04 04	174	02 07	175	04 15
176	00 07	177	06 03	178	04 14	179	02 08
180	04 15	181	02 00	182	06 03	183	04 14
184	02 09	185	04 15	186	02 01	187	06 03
188	04 14	189	03 00	190	04 05	191	02 08
192	06 02	193	06 06	194	04 04	195	03 02
196	04 05	197	02 09	198	06 02	199	04 05
200	00 09	201	06 00	202	04 05	203	00 10
204	04 00	205	03 02	206	04 14	207	03 01
208	04 05	209	03 02	210	07 13	211	06 05
212	07 13	213	06 00	214	06 05	215	06 12
216	06 04	217	03 00	218	04 14	219	00 14
220	06 05	221	07 13	222	04 15	223	00 01
224	06 02	225	07 03	226	06 02	227	03 00
228	04 14	229	03 04	230	04 05	231	02 02
232	04 15	233	02 08	234	06 02	235	03 00
236	04 14	237	01 08	238	06 05	239	07 13
240	04 15	241	00 02	242	06 02	243	07 03
244	06 02	245	03 00	246	04 14	247	03 03
248	06 05	249	04 00	250	03 04	251	04 15
252	00 07	253	04 05	254	03 01	255	06 02
256	07 03	257	06 02	258	03 00	259	04 14
260	01 07	261	04 15	262	00 14	263	04 05
264	00 12	265	06 03	266	06 05	267	07 13
268	04 15	269	00 11	270	06 02	271	07 12
272	07 00	273	07 00	274	07 05	275	06 02
276	03 00	277	04 14	278	03 07	279	06 05
280	04 00	281	03 04	282	04 05	283	00 08
284	04 00	285	03 04	286	04 15	287	01 07
288	04 05	289	03 04	290	06 01	291	03 00
292	04 14	293	01 09	294	04 15	295	03 04
296	04 05	297	01 07	298	06 03	299	07 01
300	06 06	301	06 01	302	03 00	303	04 14
304	00 15	305	04 15	306	03 01	307	04 05
308	00 14	309	06 03	310	03 00	311	04 14
312	01 06	313	04 08	314	02 02	315	07 01
316	07 03	317	06 04	318	04 08	319	02 03
320	07 01	321	06 00	322	05 05	323	05 15
324	07 01	325	07 09	326	05 09	327	04 07
328	02 03	329	02 01	330	04 08	331	03 00
332	06 05	333	06 08	334	04 04	335	03 06
336	06 01	337	07 01	338	07 00	339	07 00
340	07 00	341	06 02	342	06 05	343	06 08
344	04 12	345	04 03	346	04 00	347	03 05
348	04 12	349	07 03	350	06 01	351	07 12
352	07 05	353	05 07	354	04 07	355	07 05
356	07 12	357	07 00	358	07 00	359	07 01
360	04 15	361	03 06	362	06 00	363	05 11
364	04 08	365	07 05	366	04 15	367	03 06
368	05 11	369	05 12				

Контрольная сумма кодов программы — 3617.

П-4. Расчет пусковых характеристик асинхронных двигателей (для ЭВМ «Электроника-С50»)

Описание и порядок обращения к программе

Программа позволяет рассчитать пусковые характеристики асинхронных двигателей с трапецеидальными пазами статора (всыпная обмотка) и грушевидными или овальными пазами короткозамкнутого ротора. Алгоритм программы базируется на расчетных формулах, приведенных в § 6-12.

При учете влияния вытеснения тока на параметры используются аналитические зависимости (6-230).

Учет влияния насыщения проводят по методу, изложенному в § 6-12.

Коэффициент увеличения тока при насыщении первоначально принят $k_{нас}=1$. После расчета варианта полученный $k_{нас}$ сравнивают с принятым. При расхождении, большем 5%, принятый $k_{нас}$ автоматически увеличивается и расчет повторяется. Шаг увеличения значения $k_{нас}$ принят равным 0,01.

Обозначения размеров пазов ротора в исходных данных соответствуют обозначениям на рис. 6-27, пазов статора — на рис. 6-51, *в*.

Перед вводом исходных данных набирается код программы 03 11 (клавиши 30 и 11), при этом в Рг*У* высвечивается 1, а Рг*X* погашен.

Исходные данные вводятся в последовательности их положения в табл. П-7. После каждой введенной величины нажимают клавишу S. Вывод на Рг*X* первого результата I_1, ЭВМ делает автономно. Для вывода M_* следует нажать клавишу S (табл. П-8).

Таблица П-7

Последовательность ввода исходных данных для расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в Рг*У*
1	$h'_ш$	мм	1.00000000000
2	b_1	мм	2.00000000000
3	b_2	мм	3.00000000000
4	h_1	мм	4.00000000000
5	$h_ш$	мм	5.00000000000
6	$b_ш$	мм	6.00000000000
7	q_c	мм²	7.00000000000
8	r_2	Ом	8.00000000000
9	r_c	Ом	9.00000000000
10	$\lambda_{д2}$	—	10.0000000000
11	$\lambda_{л2}$	—	11.0000000000
12	$\sigma_{ск}$	—	12.0000000000
13	r'_2	Ом	13.0000000000
14	x'_2	Ом	14.0000000000
15	$I'_{2н}$	А	15.0000000000

Продолжение

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
16	r_1	Ом	16.0000000000
17	x_1	Ом	17.0000000000
18	$U_{1н}$	В	18.0000000000
19	x_{12}	Ом	19.0000000000
20	$k_\mu=\frac{F_п}{F_\delta}$	—	20.0000000000
21	v_i	—	21.0000000000
22	t_1	мм	22.0000000000
23	t_2	мм	23.0000000000
24	δ	мм	24.0000000000
25	$k_{Fср}$	—	25.0000000000
26	$\lambda_{дi}$	—	26.0000000000
27	$\lambda_{л1}$	—	27.0000000000
28	$\lambda_{п1}$	—	28.0000000000
29	$h_{ш1}$	мм	29.0000000000
30	h'_1	мм	30.0000000000
31	$b_{ш1}$	мм	31.0000000000
32	$I_{1н}$	А	32.0000000000
33	$s_н$	—	33.0000000000
34	s	—	34.0000000000

Примечания: 1. К пп. 1—6: $h'_ш$, b_1, b_2, h_1, $h_ш$ и $b_ш$ — размеры паза ротора по рис. 6-27. Для полузакрытых пазов задавать $h'_ш$ —0.

2. К п. 15: $I'_{2н}$ задавать по данным расчета рабочей характеристики.

3. К п. 25:

$$k_{Fср}=\frac{0{,}7u_{пi}}{a_1}\left(k'_\beta+k_{yi}\,k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right)$$

Из (6-252):

$$F_{п,ср}=\frac{0{,}7I_{1нас}\,u_{пi}}{a_1}\left(k'_\beta+k_{yi}\,k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right)=$$
$$=I_{1нас}\,k_{Fср}.$$

4. К пп. 29—31: размеры паза статора $h_{ш1}$, h'_1 и $b_{ш1}$ — по рис. 6-51, *в*.

5. К пп. 32 и 33: $I_{1н}$ и $s_н$ — по данным расчета рабочей характеристики.

Таблица П-8

Последовательность вывода результатов расчета пусковых характеристик на регистр *X*

№ п/п.	Обозначение	Единица	№ регистра памяти в РгУ
1	I_{1*}	—	35.0000000000
2	M_*	—	36.0000000000

На этом расчет точек пусковых характеристик, соответствующих заданному скольжению, заканчивается. Для перехода к следующей точке характеристики необходимо перемотать магнитную ленту, для чего нажимают клавишу S. После перемотки набирают новое значение скольжения и вновь нажимают клавишу S. ЭВМ считает I_* и M_* для нового заданного скольжения. Порядок вывода результатов расчета на регистр X такой же, как и для первого варианта.

Текст программы расчета пусковых характеристик. Блок 1

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
000	04 08	001	03 10	002	07 03	003	07 04
004	06 04	005	07 15	006	05 15	007	05 04
008	02 14	009	04 08	010	03 11	011	07 01
012	06 04	013	04 08	014	03 12	015	07 15
016	05 15	017	05 04	018	07 01	019	06 00
020	07 03	021	07 05	022	05 09	023	04 07
024	03 12	025	04 08	026	02 14	027	07 01
028	07 12	029	07 00	030	04 04	031	03 05
032	04 15	033	00 02	034	04 05	035	00 03
036	06 00	037	07 02	038	06 03	039	04 06
040	00 04	041	06 00	042	04 14	043	04 05
044	04 05	045	03 04	046	06 12	047	06 02
048	07 12	049	07 00	050	07 06	051	07 03
052	07 06	053	06 02	054	04 14	055	03 06
056	07 02	057	06 02	058	06 05	059	04 14
060	12 00	061	02 10	062	04 15	063	12 00
064	06 06	065	04 14	066	12 00	067	02 01
068	02 02	069	04 15	070	12 00	071	06 00
072	04 14	073	03 07	074	06 01	075	06 01
076	04 14	077	03 08	078	04 15	079	03 06
080	07 02	081	06 02	082	06 05	083	04 14
084	12 00	085	02 11	086	04 15	087	12 00
088	06 06	089	04 14	090	12 00	091	02 01
092	02 03	093	04 15	094	12 00	095	06 01
096	06 05	097	04 03	098	03 07	099	04 03
100	03 08	101	04 05	102	03 06	103	04 02
104	03 07	105	04 03	106	03 08	107	07 02
108	04 03	109	03 08	110	07 03	111	04 02
112	03 08	113	04 15	114	04 05	115	04 05
116	03 07	117	06 03	118	04 14	119	03 06
120	04 15	121	00 02	122	07 02	123	06 03
124	06 06	125	04 01	126	03 06	127	04 15
128	00 02	129	04 05	130	00 03	131	06 01
132	04 05	133	00 04	134	06 03	135	04 05
136	03 06	137	07 11	138	06 02	139	04 05
140	00 02	141	06 00	142	06 00	143	07 02
144	06 03	145	04 05	146	03 06	147	06 02
148	04 14	149	03 06	150	04 05	151	00 02
162	07 13	153	06 04	154	06 09	155	06 02
156	07 08	157	06 03	158	06 05	159	04 06
160	03 06	161	06 00	162	04 05	163	00 07
164	06 06	165	06 03	166	07 01	167	06 01
168	04 06	169	00 09	170	06 02	171	04 05
172	00 08	173	06 03	174	07 01	175	06 00
176	04 14	177	03 07	178	04 06	179	00 13
180	06 02	181	04 14	182	04 01	183	04 05
184	01 06	185	06 00	186	04 14	187	03 09
188	04 15	189	03 06	190	04 05	191	00 07
192	06 03	193	07 01	194	06 06	195	06 01
196	04 05	197	00 04	198	06 06	199	07 13
200	06 02	201	04 05	202	00 02	203	06 03
204	07 03	205	06 03	206	04 14	207	04 00
208	04 15	209	00 06	210	04 05	211	00 02
212	06 03	213	07 02	214	06 03	215	07 12
216	07 06	217	07 06	218	04 00	219	04 00
220	06 05	221	04 01	222	04 00	223	04 05
224	04 00	225	04 02	226	03 08	227	04 15
228	00 05	229	04 06	230	00 06	231	06 03
232	06 05	233	04 04	234	04 07	235	04 00
236	04 00	237	04 15	238	00 01	239	07 01
240	07 12	241	07 01	242	07 02	243	04 12
244	07 03	245	06 02	246	04 05	247	00 15
248	06 03	249	04 05	250	02 01	251	06 03
252	04 14	253	04 06	254	06 05	255	04 00
256	04 00	257	04 15	258	03 08	259	04 05
260	04 07	261	06 00	262	04 14	263	03 08
264	04 05	265	00 10	266	06 00	267	04 00
268	04 00	269	04 05	270	00 11	271	06 00
272	04 00	273	04 00	274	04 05	275	04 00
276	06 03	277	04 05	278	00 14	279	06 02
280	04 06	281	00 12	282	06 02	283	04 05
284	01 07	285	06 00	286	04 14	287	04 08
288	07 00	289	06 04	290	12 02	291	04 08
292	02 01	293	06 04	294	04 12	295	05 14
296	06 02	297	06 05	298	04 07	299	15 15
300	04 08	301	02 02	302	06 04	303	07 09
304	07 00	305	06 01	306	06 05	307	04 08
304	02 03	309	06 04	310	07 03	311	07 06
312	07 00	313	06 03	314	06 05	315	06 08

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
316	06 01	317	07 04	318	06 02	319	06 05
320	06 08	321	06 01	322	04 12	323	06 12
324	06 09	325	06 02	326	07 02	327	06 03
328	06 05	329	07 13	330	04 04	331	04 04
332	07 01	333	07 06	334	06 04	335	07 01
336	04 04	337	00 00	338	04 08	339	15 14
340	04 05	341	04 04	342	04 02	343	00 00
344	06 05	345	04 03	346	00 00	347	07 01
348	06 01	349	06 05	350	07 11	351	04 03
352	00 00	353	07 01	354	06 01	355	04 00
356	00 00	357	04 12	358	04 11	359	04 07
360	15 14	361	04 15	362	00 00	363	07 12
364	07 05	365	07 10	366	07 11	367	07 01
368	07 01	369	06 01	370	06 01	371	06 05
372	04 12	373	05 12	374	04 07	375	15 15
376	04 08	377	02 10	378	03 01	379	06 01
380	04 08	381	03 13	382	07 02	383	06 03
384	06 05	385	04 07	386	15 15	387	04 08
388	03 01	389	06 14	390	06 04	391	06 15
392	05 11	393	04 08	394	02 11	395	03 01
396	06 00	397	03 13	398	04 03	399	15 15
400	05 11	401	05 12				

Контрольная сумма кодов блока — 4208.

Блок 2

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
000	04 08	001	02 04	002	04 05	003	03 09
004	07 13	005	06 04	006	04 05	007	04 08
008	07 13	009	06 00	010	04 05	011	01 08
012	06 06	013	06 12	014	06 03	015	04 05
016	03 05	017	06 02	018	04 14	019	04 02
020	04 05	021	02 05	022	06 02	023	04 14
024	00 00	025	04 15	026	02 02	027	04 05
028	02 03	029	06 00	030	04 05	031	02 04
032	06 03	033	07 02	034	07 12	035	07 05
036	06 06	037	06 15	038	06 12	039	06 02
040	07 12	041	07 06	042	07 04	043	06 00
044	04 05	045	02 04	046	06 02	047	07 12
048	07 01	049	07 06	050	06 02	051	04 05
052	00 00	053	06 06	054	06 15	055	04 12
056	04 04	057	06 02	058	07 02	059	06 01
060	04 14	061	04 03	062	06 09	063	06 02
064	07 08	065	06 03	066	04 12	067	05 14
068	06 02	069	06 05	070	02 02	071	06 04
072	07 12	073	07 01	074	07 06	075	06 02
076	07 12	077	07 00	078	07 05	079	07 08
080	04 02	081	04 03	082	04 05	083	04 03
084	06 00	085	07 12	086	07 08	087	07 04
088	06 06	089	06 01	090	07 01	091	05 08
092	06 04	093	05 14	094	04 14	095	00 00
096	06 06	097	06 01	098	04 14	099	12 00
100	04 15	101	02 02	102	04 05	103	03 01
104	06 01	105	04 05	106	12 00	107	06 02
108	04 14	109	04 04	110	04 05	111	02 06
112	04 15	113	00 00	114	06 02	115	04 14
116	12 00	117	04 15	118	03 00	119	07 12
120	07 05	121	07 08	122	06 02	123	04 05
124	02 09	125	06 00	126	04 05	127	04 04
128	06 02	129	04 05	130	03 01	131	06 03
132	04 14	133	03 06	134	06 04	135	07 01
136	07 12	137	07 05	138	06 02	139	04 05
140	04 04	141	06 00	142	04 05	143	03 06
144	06 06	145	06 03	146	04 05	147	02 08
148	04 04	149	03 06	150	06 06	151	06 01
152	04 06	153	12 00	154	06 00	155	04 05
156	02 07	157	06 00	158	04 00	159	03 03
160	04 05	161	02 06	162	04 00	163	03 06
164	04 05	165	03 06	166	06 03	167	04 05
168	01 07	169	06 02	170	04 14	171	12 00
172	07 01	173	06 04	174	04 05	175	00 00

№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код	№ шага	Код
176	06 01	177	04 14	178	04 04	179	04 15
180	02 03	181	04 05	182	00 06	183	05 01
184	04 05	185	04 04	186	06 06	187	06 02
188	04 14	189	04 04	190	04 05	191	00 06
192	06 00	193	06 02	194	04 05	195	04 04
196	06 06	197	06 03	198	04 05	199	00 05
200	06 02	201	04 05	202	03 08	203	06 06
204	06 01	205	04 14	206	04 04	207	04 15
208	03 02	209	04 05	210	04 02	211	06 03
212	07 01	213	06 05	214	06 01	215	04 05
216	04 06	217	05 02	218	05 05	219	04 01
220	04 04	221	04 15	222	00 10	223	04 05
224	00 00	225	06 02	226	04 05	227	04 04
228	06 00	229	04 05	230	00 11	231	06 00
232	04 05	233	04 00	234	05 03	235	04 05
236	00 14	237	06 02	238	04 14	239	04 04
240	04 05	241	12 00	242	06 00	243	04 05
244	03 09	245	07 13	246	06 06	247	07 13
248	06 00	249	06 05	250	06 12	251	04 15
252	01 03	253	06 03	254	03 05	255	04 06
256	04 02	257	05 05	258	05 01	259	05 03
260	07 01	261	07 00	262	07 00	263	06 02
264	07 05	265	06 06	266	06 07	267	05 07
268	04 07	269	02 05	270	02 15	271	04 08
272	02 05	273	07 12	274	07 00	275	07 01
276	04 00	277	03 05	278	04 15	279	03 05
280	07 01	281	07 12	282	07 04	283	05 09
284	04 07	285	02 04	286	02 15	287	05 14
288	05 14	289	05 14	290	05 14	291	02 04
292	04 08	293	02 02	294	06 04	295	07 09
296	07 00	297	06 01	298	07 03	299	07 05
300	07 00	301	06 03	302	06 05	303	06 08
304	06 01	305	07 04	306	06 02	307	06 05
308	06 08	309	06 01	310	04 12	311	06 12
312	06 09	313	06 02	314	07 02	315	06 03
316	06 05	317	07 13	318	04 04	319	04 04
320	07 01	321	07 06	322	06 04	323	07 01
324	04 04	325	00 00	326	01 08	327	15 14
328	04 05	329	04 04	330	01 02	331	00 00
332	06 05	333	04 03	334	00 00	335	07 01
336	06 01	337	06 05	338	07 11	339	04 03
340	00 00	341	07 01	342	06 01	343	04 00
344	00 00	345	04 12	346	04 11	347	04 07
348	15 14	349	04 15	350	00 00	351	07 12
352	07 05	353	07 10	354	07 11	355	07 01
356	07 01	357	06 01	358	06 01	359	06 05
360	04 12	361	05 12	362	04 07	363	15 15
364	04 08	365	15 15	366	05 11	367	04 08
368	02 15	369	04 15	370	03 05	371	07 01
372	07 12	373	07 04	374	05 07	375	04 07
376	02 06	377	07 04	378	07 04	379	05 04
380	04 12	381	06 15	382	04 08	383	02 06
384	04 15	385	02 00	386	04 05	387	01 09
388	05 02	389	04 14	390	03 09	391	04 05
392	12 00	393	06 06	394	06 03	395	07 01
396	06 00	397	04 14	398	03 06	399	04 05
400	04 01	401	06 02	402	04 05	403	03 04
404	06 03	405	04 05	406	01 05	407	05 00
408	04 14	409	01 00	410	04 15	411	03 06
412	04 05	413	04 04	414	05 02	415	06 05
416	04 00	417	12 00	418	01 05	419	04 00
420	07 13	421	06 04	422	04 05	423	12 00
424	07 13	425	06 00	426	04 05	427	01 08
428	06 06	429	06 12	430	06 03	431	04 14
432	03 08	433	04 05	434	12 00	435	04 15
436	03 09	437	06 00	438	04 05	439	04 00
440	07 13	441	06 05	442	07 13	443	06 00
444	04 05	445	03 08	446	06 05	447	05 12
448	06 02	449	04 05	450	03 05	451	06 03
452	04 05	453	03 09	454	06 04	455	04 05
456	03 02	457	06 03	458	04 14	459	03 05
460	04 15	461	03 03	462	04 05	463	00 15
464	06 03	465	04 05	466	03 07	467	06 06
468	07 13	469	06 02	470	04 05	471	03 03
472	06 02	473	04 05	474	03 04	475	06 03
476	04 14	477	03 05	478	07 03	479	07 04
480	06 04	481	01 08	482	02 07	483	07 01
484	06 00	485	05 05	486	05 15	487	07 03
488	07 06	489	05 09	490	04 07	491	02 07
492	12 00	493	07 00	494	06 04	495	12 02
496	04 07	497	03 10	498	05 12		

Контрольная сумма кодов блока — 5280.

П-5. Расчет коэффициентов k_r и $k_д$ для стержней обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя

В § 6-14 изложен принцип расчета и даны расчетные формулы для определения коэфициентов k_r и $k_д$ обмоток короткозамкнутых роторов с пазами произвольной конфигурации. Точность этого метода определяется количеством (n) элементарных слоев, на которые подразделяется массивный стержень обмотки ротора. При большом числе n решение уравнений (6-303) целесообразно проводить с помощью ЭВМ.

В программе нумерация элементарных слоев в схеме замещения массивного стержня (см. рис. 6-56) для удобства записи программы изменена на обратную по сравнению с текстом § 6-14. Расчет проводится на длину пазовой части стержня.

При принятой нумерации слоев ток k-го контура с учетом (6-303) будет равен:

$$\dot{I}_k = \dot{I}_{k-1}\frac{r_{k-i}}{r_k} + j\frac{x_{k-1}}{x_k}\sum_{i=1}^{k-1}\dot{I}_i. \quad (\text{П-1})$$

После решения системы (6-303), которое проводим, принимая ток в первом нижнем элементарном слое $\dot{I}_1=1$ и учитывая, что

$$r_k = \rho_k\frac{l_c}{q_k} \equiv \frac{1}{q_k},$$

где q_k — поперечное сечение k-го элементарного слоя, получаем следующие выражения для расчета коэффициентов k_r и $k_д$:

$$k_r = \frac{\sum_{k=1}^{n}|\dot{I}_k|^2/q_k}{|\dot{I}_c|^2/q_c}; \quad (\text{П-2})$$

$$k_д = \frac{\sum_{k=1}^{n}\left[\lambda_k\left|\sum_{i=1}^{k}\dot{I}_i\right|^2\right]}{\sum_{k=1}^{n}\left[\lambda_k\left(\sum_{i=1}^{k}q_i\right)^2\right]}\frac{q_c^2}{|\dot{I}_c|^2}. \quad (\text{П-3})$$

Коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником, с учетом эффекта вытеснения тока равен:

$$\lambda'_{п\xi с} = \sum_{k=1}^{n}\left[\lambda_k\left|\sum_{i=1}^{k}\dot{I}_i\right|^2\right]\frac{1}{|\dot{I}_c|^2}. \quad (\text{П-4})$$

Тот же коэффициент без учета влияния вытеснения тока, т. е. при постоянстве плотности тока по всему сечению стержня,

$$\lambda'_{пс} = \sum_{k=1}^{n}\lambda_k\left(\sum_{i=1}^{k}\frac{q_i}{q_c}\right)^2. \quad (\text{П-5})$$

В выражениях (П-5)—(П-8) q_c — площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \sum_{k=1}^{n}q_к; \quad (\text{П-6})$$

$\dot{I}_c$ — ток стержня, выраженный через ток в нижнем элементарном слое, равный $\dot{I}_1=1$:

$$\dot{I}_c = \sum_{k=1}^{n}\dot{I}_k. \quad (\text{П-7})$$

Напомним, что в этих выражениях индексы $k=1\div n$ соответствуют порядковым номерам элементарных слоев, начиная с нижнего слоя, для которого $k=1$. Индексы $i=1\div k$ соответствуют элементарным слоям, расположенным в пазу ниже слоя, имеющего номер k.

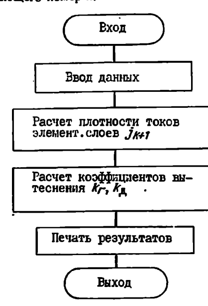


Рис. П-1.

Расчет на ЭВМ проводят для различных частот тока в стержне $f_2=f_1 s$, изменяя скольжение s в требуемых пределах.

Программа, схема которой представлена на рис. П-1, составлена на языке ФОРТРАН применительно к ЦВМ «Минск-32». Время счета одного варианта с распечаткой результатов составляет 0,5—1,5 мин в зависимости от количества принятых элементарных слоев.

В программе приняты следующие обозначения исходных данных:

F(K) — массив частот f_2, Гц;
KJ — число элементов массива частот;
N — число n элементарных слоев стержня;
D — длина пазовой части стержня l_c, м, на которой рассчитывается влияние эффекта вытеснения тока;
ГС — удельная электрическая проводимость стержня при расчетной температуре ϑ, См·м/мм²;
H — высота стержня h_c, мм;
LY(N) — массив коэффициентов магнитной проводимости участков паза, занятых элементарными слоями λ_k;

SY(N) — массив площадей поперечных сечений элементарных слоев.

Результаты расчета, выводимые на печать, имеют следующие обозначения:

RC — активное сопротивление стержня длиной l_c без учета вытеснения тока;

RЭ — активное сопротивление стержня длиной l_c с учетом эффекта вытеснения тока;

Рис. П-2.

LП — коэффициент магнитной проводимости участка паза длиной l_c, занятого стержнем с током, без учета эффекта вытеснения тока;

LЭ — коэффициент магнитной проводимости участка паза длиной l_c, занятого стержнем с током с учетом эффекта вытеснения тока;

KСИ — расчетная приведенная высота стержня h_ξ;

KR — коэффициент увеличения активного сопротивления стержня;

KX — коэффициент уменьшения проводимости пазовой части участка паза, занятого стержнем, под влиянием эффекта вытеснения тока;

J(N) — плотность тока в элементарных слоях (в комплексной форме) в относительных единицах;

JMOD(N) — модули плотностей токов в элементарных слоях (в относительных единицах).

Выведенные на печать результаты расчета KСИ, J(N) и JMOD(N) в дальнейшем расчете параметров асинхронной машины не участвуют и представляют интерес только для анализа эффекта вытеснения тока в стержнях различной конфигурации.

Ниже приведены текст программы и пример расчета эффекта вытеснения тока в стержнях двухклеточного ротора с пазами, залитыми алюминием (рис. П-2), имеющего общие для рабочей и пусковой клеток замыкающие кольца.

Текст программы расчета коэффициентов k_r и k_x

```
      COMPLEX J (100), SUM3, SUM5, J1
      DIMENSION SY (100), R (100), F (50)
      REAL LY (100), JM (100), LП, KСИ,
     LЭ, KR, KX
    1 FORMAT (///25X, 29H П Р О Г Р А М-
     М А  S K I N  I)
    2 FORMAT (I3, (15F5.1))
    3 FORMAT (16F5.2)
    4 FORMAT (///25X, 29H И С Х О Д Н Ы Е
     Д А Н Н Ы Е//)
    5 FORMAT (10X, 3HN-, I4,5X, 4HKJ-, I4,
     5X, 3HD-, F9.2, *5X, 3HH-, F7.2,5X,
     4HГС-, F8.3//)
    6 FORMAT (14X, 12HМАССИВ SY(N)/
     /(8X, 10F10.4))
    7 FORMAT (14X, 12HМАССИВ LY(N)/
     /(8X, 10F10.4))
    8 FORMAT (//20X, 35H Р Е З У Л Ь Т А-
     Т Ы  Р А С Ч Е Т А//)
    9 FORMAT (13X, 4HRC-, F9.5,6X, 4HLП-,
     F8.4//)
   10 FORMAT (13X, 1HF, 6X, 3HKСИ, 11X,
     2HRЭ, 8X, 2HLЭ, 9X, 2HKR, *7X,
     2HKX//)
   11 FORMAT (10X, F6.2, 2X, F7.4, 6X, F8.5,
     2X, F7.4, 4X, F7.4, *3X, F7.5)
   12 FORMAT (/14X, 21H МАССИВ ПЛ.
     ТОКОВ J(N)/(5X, 10F11.4))
   13 FORMAT (/14X, 24H МАССИВ ПЛ.
     ТОКОВ JMOD(N)/(5X, 10F11.4))
   14 FORMAT (/)
      READ (1,2) KJ, (F(K), K-1, KJ)
   19 WRITE (3,14)
      READ (1,2) N, D, H, ГС
       READ (1,3) (LY(K), K-1, N)
       READ (1,3) (SY(K), K-1, N)
       WRITE (3,1)
       WRITE (3,4)
       WRITE (3,5) N, KJ, D, H, ГС
       WRITE (3,7) (LY(K), K-1, N)
       WRITE (3,14)
       WRITE (3,6) (SY(K), K-1, N)
       WRITE (3,8)
       П-3.14159
       Л-8.0*П**2*1.E—7
       J1-(0.0,1.0)
       SUM1-0.0
       SUM2-0.0
       DO 15 L-1, N
       R(L)-D/(ГС*SY(L))
       Д1-1.0/R(L)
```

Продолжение

```
      SUM1-SUM1+Д1
      Д2-LY(L)*SUM1**2
      SUM2-SUM2+Д2
   15 CONTINUE
      RC-1.0/SUM1
      LП-(RC**2)*SUM2
      WRITE (3,9) RC, LП
      WRITE (3,10)
      J(1)-(1.0,0.0)
      DO 18 KL-1, KJ
      SUM3-J(1)*SY(1)
      DO 16 L-2, N
      I-L—1
     J(L)-J(I)+J1*Л*F(KL)*ГС*LY(I)*SUM3
      SUM3-SUM3+J(L)*SY(L)
   16 CONTINUE
      SUM4-0.0
      SUM5-(0.0,0.0)
      SUM6-0.0
      DO 17 L-1, N
      JM(L)-CABS(J(L))
      B-JM(L)**2*SY(L)*D/ГС
      SUM4-SUM4+B
      SUM5-SUM5+J(L)*SY(L)
      SI-CABS(SUM5)
      B1-SI**2*LY(L)
      SUM6-SUM6+B1
   17 CONTINUE
      SI2-SI**2
      КСИ-(2.0*П*H*SQRT(ГС*F(KL)/10.0))/
      /1000.0
      RЭ-SUM4/SI2
      LЭ-SUM6/SI2
      KR-RЭ/RC
      KX-LЭ/LП
      WRITE (3,11)F(KL), КСИ, RЭ, LЭ
      KR, KX
      IF(KL.NE.KJ)GO TO 18
      WRITE (3,12)(J(K), K-1, N)
      WRITE (3,13)(JM(K), K-1, N)
   18 CONTINUE
      GO TO 19
  600 STOP
      END
```

Пример распечатки расчета коэффициентов k_r и $k_д$ стержня двухклеточного ротора (рис. П-2)

Исходные данные

N=15 KJ=15 D=1000.00 H=48.00 ГС=23.000

Массив LY(N)

1.0450 0.8870 0.7920 0.7390 0.8330 2.4340 0.4000 0.3300 0.3080 0.2980
0.2980 0.3330 0.3080 0.3400 0.2890

Массив SY(N)

29.6400 38.1800 42.2200 47.4000 48.7300 7.9500 0.9500 5.2600 8.3150 8.2000
8.2650 8.9350 7.7800 5.2000 0.9350

Результаты расчета

RC=0.16226 LП=4.9128

F	КСИ	RЭ	LЭ	KR	KX
0.00	0.0000	0.16226	4.9128	1.0000	1.00000
1.00	0.4574	0.16347	4.9064	1.0075	0.99870
2.00	0.6468	0.16708	4.8874	1.0297	0.99484
3.00	0.7922	0.17301	4.8562	1.0663	0.98848
4.00	0.9148	0.18114	4.8134	1.1164	0.97978
5.00	1.0228	0.19132	4.7599	1.1791	0.96889
10.00	1.4464	0.26559	4.3705	1.6368	0.88962
15.00	1.7715	0.35858	3.8859	2.2100	0.79097
20.00	2.0455	0.44934	3.4179	2.7693	0.69571
25.00	2.2869	0.52829	3.0173	3.2559	0.61417
30.00	2.5052	0.59362	2.6931	3.6585	0.54818
35.00	2.7059	0.64688	2.4364	3.9868	0.49593
40.00	2.8928	0.69047	2.2339	4.2554	0.45472
45.00	3.0683	0.72659	2.0733	4.4781	0.42203
50.00	3.2342	0.75703	1.9447	4.6656	0.39585

Массив пл. токов J(N)

1.0000 0.0000 1.0000 0.2812 0.9135 0.8275 0.5851 1.5925 —0.2279 2.4925
—2.0630 3.4228 —8.0265 5.7792 —9.0265 6.1387 —9.9482 6.2930 —10.9549 6.2057
—12.0665 5.8782 —13.3096 5.2808 —14.8413 4.2537 —16.3507 2.9808 —18.0646 1.3132

Массив пл. токов JMOD(N)

1.0000 1.0338 1.2326 1.6966 2.5029 3.9966 9.8906 10.9191 11.7716 12.5905
13.4221 14.3189 15.4389 16.6201 18.1123

П-6. Расчет магнитной цепи и характеристика холостого хода синхронных машин и машин постоянного тока

В данном приложении рассматривается принцип составления и реализации программы для расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода машин постоянного тока и явнополюсной синхронной машины. Принцип расчета машины постоянного тока и синхронной машины идентичен. Перед расчетом магнитной цепи должны быть определены главные размеры и геометрия машины. Расчет ведется по обычным уравнениям для расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода машины постоянного тока и явнополюсной синхронной машины.

Схема расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода машины постоянного тока приведена на рис. П-3, а схема для синхронной машины — на рис. П-4.

Программа реализована на алгоритмическом языке ФОРТРАН применительно к ЭВМ «Минск-32».

Расчет магнитной цепи и характеристики холостого хода соответствует общепринятой методике.

Задавшись несколькими значениями ЭДС E, для каждого из них определяют МДС, необходимую для проведения соответствующего магнитного потока через все участки магнитной цепи.

Программа расчета составлена таким образом, что требуется просчитать вручную одну точку, соответствующую номинальной ЭДС. Такое исполнение программы дает ряд преимуществ. Во-первых, расчетчик непосредственно рассчитывает контрольную точку. Во-вторых, просчитав вручную номинальную точку, из геометрии машины определяют коэффициенты пропорциональности между рассчитываемыми величинами (потоками, индукциями, МДС) и ЭДС, которая является варьируемым параметром. Другими словами, составляется функциональная зависимость рассчитываемых величин от ЭДС. Такая постановка задачи исключает ввод большого числа исходных данных, так как они уже присутствуют в коэффициентах пропорциональности, и поэтому вводятся кривые намагничивания $B=f(H)$ и сами коэффициенты пропорциональности. В-третьих, правильность расчета при отладке можно проверить по контрольной точке, рассчитанной вручную.

Программа расчета состоит из основной (головной) программы и подпрограммы-функции, которая производит выбор значений H по известным значениям индукции B. В программу расчета синхронной машины кроме указанной подпрограммы-функции вводится еще подпрограмма-функция $\zeta=f(B_a)$.

Программа для расчета магнитной цепи для машины постоянного тока называется POSTM, для синхронной машины — SINHR, Подпрограмма для расчета $B=f(H)$ называется MAGN, а подпрограмма для расчета $\zeta=f(B_a)$—ZETA.

При записи математических выражений на языке ФОРТРАН используются так называемые идентификаторы (символы). Каждая величина описывается символом. В табл. П-9 и П-10 представлены эти обозначения.

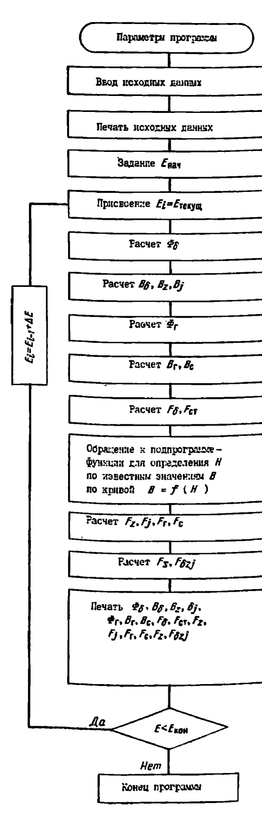


Рис. П-3.

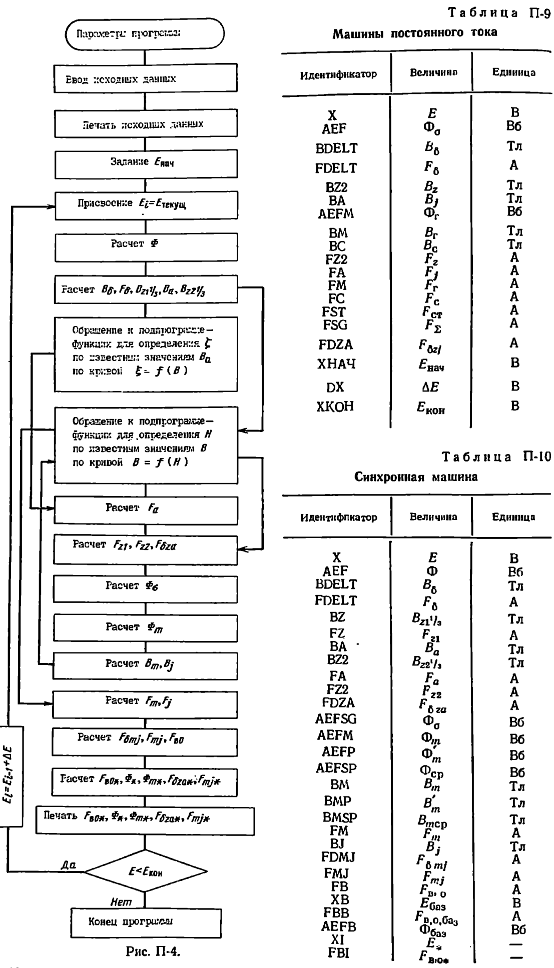


Рис. П-4.

Таблица П-9

Машины постоянного тока

Идентификатор	Величина	Единица
X	E	В
AEF	Φ_σ	Вб
BDELT	B_δ	Тл
FDELT	F_δ	А
BZ2	B_z	Тл
BA	B_j	Тл
AEFM	$\Phi_г$	Вб
BM	$B_г$	Тл
BC	$B_с$	Тл
FZ2	F_z	А
FA	F_j	А
FM	$F_г$	А
FC	$F_с$	А
FST	$F_{ст}$	А
FSG	F_Σ	А
FDZA	$F_{\delta zj}$	А
XHAЧ	$E_{нач}$	В
DX	ΔE	В
XKOH	$E_{кон}$	В

Таблица П-10

Синхронная машина

Идентификатор	Величина	Единица
X	E	В
AEF	Φ	Вб
BDELT	B_δ	Тл
FDELT	F_δ	А
BZ	$B_{z1}{}^1/_3$	Тл
FZ	F_{z1}	А
BA	B_a	Тл
BZ2	$B_{z2}{}^1/_3$	Тл
FA	F_a	А
FZ2	F_{z2}	А
FDZA	$F_{\delta za}$	А
AEFSG	Φ_σ	Вб
AEFM	Φ_m	Вб
AEFP	Φ'_m	Вб
AEFSP	$\Phi_{ср}$	Вб
BM	B_m	Тл
BMP	B'_m	Тл
BMSP	$B_{mср}$	Тл
FM	F_m	А
BJ	B_j	Тл
FDMJ	$F_{\delta mj}$	А
FMJ	F_{mj}	А
FB	$F_{в,о}$	А
XB	$E_{баз}$	В
FBB	$F_{в,о,баз}$	А
AEFB	$\Phi_{баз}$	Вб
XI	E_*	—
FBI	$F_{в.о*}$	—

Индентификатор	Величина	Единица
AEFI	Φ_*	—
AEFMI	Φ_{m*}	—
FDZAI	$F_{бza_*}$	—
FMJI	F_{mj*}	—
XHAЧ	$E_{нач}$	B
DX	ΔE	B
XKOH	$E_{кон}$	B

Коэффициенты пропорциональности, рассчитанные вручную, обозначены следующим образом: A — при расчете потоков, B — при расчете индукций, C — при расчете МДС.

Программа расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода машины постоянного тока и синхронной машины

Программа расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода синхронной машины составлена по методике, изложенной в гл. 7, а для машины постоянного тока — в гл. 8.

Основная программа составлена в функции ЭДС (в программе E обозначено через X). Задается начальное значение ЭДС

X = XHAЧ.

Начальное значение E обычно принимается равным $0{,}5\,E_н$. Потом задается шаг по E на выбор расчетчика. В данном случае шаг принимался равным $0{,}25\,E_н$. В программе шаг по E (или ΔE — приращение по E) обозначается через DX. Конечное значение E (в программе обозначено XKOH) выбирается расчетчиком, обычно $E_{кон} = 1{,}5\,E_н$.

Далее следует расчет по приведенному алгоритму. После того как будут рассчитаны все величины, они выводятся на печать с помощью оператора WRITE. Потом требуется сравнить ЭДС с его конечным значением XKOH. Это сравнение производится с помощью оператора IF. Если X меньше XKOH, то значение X увеличивается на шаг по ЭДС ΔE(DX), т. е. $E_i = E_{i-1} + \Delta E$ (X=X+DX), и цикл повторяется снова до тех пор, пока текущее значение X не станет равным XKOH или больше него. Если это произошло, то управление передается операторам STOP и END. Программа расчета считается выполненной.

Для вычисления H по кривым намагничивания $B = f(H)$, заданным отдельным точкам, используется метод кусочно-линейной интерполяции. В ЭВМ вводятся значения H из таблицы для кривой намагничивания с определенным шагом ΔB, который задается по индукции B. При реализации приведенных здесь программ задавался шаг $\Delta B = 0{,}05$ Тл (в программе он обозначен через R). Определив индукцию в каком-нибудь участке магнитной цепи, программа осуществляет последовательный перебор заданных точек (i) кривой намагничивания электротехнической стали выбранной марки, причем, чтобы не загружать память ЭВМ, значения H заданы до некоторого значения индукции B, после которого зависимость $B = f(H)$ принимает прямолинейный характер. Назовем условно это значение индукции B_{max} (в программе $B_{max} = 2{.}45$ Тл). Если индукция B меньше B_{max}, то определяется ближайшая метка, соответствующая данной индукции, I = INT(G/R)+2, через G здесь обозначена индукция. А если индукция B равна или больше индукции, после которой начинается прямолинейный участок характеристики намагничивания, то значение B отыскивают по двум последним точкам. В программе это отражено следующим образом:

IF (G.GE.BMAX) I = 50.

Таким образом, на кривой намагничивания определяют i-ю и i—1-ю точки, между которыми заключена рассчитанная индукция, как показано на рис. П-5.
Участок между этими точками спрямляется (линеаризуется), тогда по рис. П-5 напряженность H может быть определена по формуле

$$\left.\begin{aligned} &MAGN = H(L) + (H(I) - H(L)) * \\ &\quad *(G - R*FLOAT(J))/R; \\ &L = I - 1; \\ &J = I - 2. \end{aligned}\right\} \qquad (П\text{-}9)$$

После того как H определена, ее значение переводится в основную программу расчета. Программа для отыскания ζ составлена таким же образом.

Текст программы SINHR

```
      DIMENSION H1 (50), H2 (50), H3 (50),
      H4 (50), Z1 (35)
      COMMON/TM/H1, H2, H3, H4, X
      COMMON/TZ/Z1, X1
      REAL MAGN
      X-X1
      READ  (1,1) (H, (I),  I-1,43),  (H1 (I),
      I-44,50)
      READ  (1,7)(H2(I),  I-1,41),  (H2(I),
      I-42,50)
      READ (1,4)(H3(I), I-1,50)
      READ (1,4)(H4(I), I-1,50)
    1 FORMAT  (20F4.1/20F4.1/3F4.1,7F5.0)
    7 FORMAT  (20F4.1/20F4.1/F4.1,9F5.0)
    4 FORMAT (20F4.1)
      WRITE (3,201)
      WRITE (3,202) H1
      WRITE (3,203)
      WRITE (3,202) H2
      WRITE (3,204)
      WRITE (3,202) H3
      WRITE (3,205)
      WRITE (3,202) H4
  202 FORMAT (10F12.4)
  201 FORMAT (////20X, 2HHA, 5H—,
     * 15HM A G N E T I C
     *, 4X,    13HDE N S I T Y,   4X,  9HT
      A B L E//)
  203 FORMAT (////20X, 2HHZ, 5H—,
     *15HM A G N E T I C
```

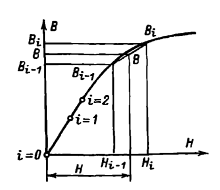


Рис. П-5.

```
     *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X, 9HT A B-
     L E//)
204  FORMAT (////20X, 2HHJ, 5H—,
     * 15HM A G N E T I C
     *, 4X,    13HDE N S I T Y,    4X,    9HT
     A B L E//)
205  FORMAT (////20X, 2HHM, 5H—,
     * 15HM A G N E T I C
     *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X, 9HT A B-
     L E//)
     READ (1,3) Z1
  3  FORMAT (16F5.3)
     READ (1,2) A1, A2, A3, A4
     READ (1,5) B1, B2, B3
    *, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10
     READ (1,6) C1, C2, C3
     *, C4, C5, C6, C7
     READ (1,8) FBB, XB
     READ (1,9) AEFB
     READ (1,10) XHAЧ, DX, XKOH
  2  FORMAT (4E8.3)
  5  FORMAT (10E8.3)
  6  FORMAT (7F4.2)
  8  FORMAT (2F7.2)
  9  FORMAT (E8.3)
 10  FORMAT (3F6.1)
     WRITE (3,301) A1, A2, A3, A4
301  FORMAT (4E12.3)
     WRITE (3,302) B1, B2, B3
     *, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10 .
302  FORMAT (10E12.3)
303  FORMAT (6F10.3, F10.0)
     WRITE (3,304) AEFB, FBB, XB, XHAЧ,
     DX, XKOH
304  FORMAT (E12.4, 5F10.2)
     X-XHAЧ
 12  X-X
     AEF-A1*X
     BDELT-B1*X
     BZ-B2*X
     BA-B3*X
     BZ2-B4*X
     FDELT-C1*X
     FA-C2*ZETA(BA, 3)*MAGN (BA, 5)
     FZ-C3*MAGN (BZ, 7)
     FZ2-C4*MAGN(BZ2,7)
     FDZA-FDELT+FZ+FZ2+FA
     AEFSG-A2*FDZA
     AEFM-A1*X+A2*FDZA
     AEFP-A1*X+A3*FDZA
     AEFSR-A1*X+A4*FDZA
     BM-B5*X+B6*FDZA
     BMP-B5*X+B7*FDZA
     BMSR-B5*X+B8*FDZA
     FM-C5* (MAGN(BM,9)+MAGN (BMP,9)+
     +4*MAGN(BMSR,9))/6.
     BJ-B9*X+B10*FDZA
     FJ-C7*MAGN(BJ, 8)
     FDMJ-C6*BM
     FMJ-FM+FDMJ+FJ
     FB-FDZA+FM+FDMJ+FJ
     XI-X/XB
     FBI-FB/FBB
     AEFI-AEF/AEFB
     AEFMI-AEFM/AEFB
     FDZAI-FDZA/FBB
     FMJI-FMJ/FBB
     WRITE (3,401) X1, FBI, AEFI, AEFMI,
     FDZAI, FMJI
401  FORMAT (6F6.3)
     IF (X-XKOH) 25, 35, 35
 25  X=X+DX
     GO TO 12
 35  STOP
     END
```

В подпрограмме MAGN имеются четыре уравнения для вычисления H по известной индукции B. Это сделано в связи с тем, что для изготовления якоря (или статора), полюсов и станины электрической машины применяются различные марки стали, имеющие соответственно различные характеристики намагничивания $B=f(H)$. Ниже приведены обозначения в программе различных марок стали и принцип вызова подпрограммы-функции основной программой.

Машина постоянного тока

1) кривая для ярма якоря (в программе обозначена H2 или HA);
2) кривая для зубцовой зоны якоря (H1 или HZ);
3) кривая для полюсов (H3 или HP);
4) кривая для станины (H4 или HS).

Синхронная машина

1) кривая для ярма статора (H1 или HA);
2) кривая для зубцовой зоны статора (H2 или HZ);
3) кривая для полюсов (H4 или HM);
4) кривая для обода ротора (H3 или HJ).

Кривая для зубцовой зоны выбирается по предварительно рассчитанному коэффициенту $K_{пх}$.

Вызов подпрограммы-функции основной программой производится следующим образом. Каждой кривой $B=f(H)$ соответствует определенная метка:

Синхронная машина

H1(HA) соответствует метка 5;
H2(HZ) соответствует метка 7;
H4(HM) соответствует метка 9;
H3(HJ) соответствует метка 8.

Кроме этой подпрограммы-функции для синхронной машины вводится также подпрограмма-функция для нахождения ζ по известному значению B_a. Эта кривая $\zeta=f(B_a)$ обозначена Z1. Z1 соответствует метка 3.

Машина постоянного тока

H2(HA) соответствует метка 6;
H1(HZ) соответствует метка 3;
H3(HP) соответствует метка 7;
H4(HS) соответствует метка 9.

После того как будут определены значения *B* для участков цепи, происходит расчет МДС (*F*) для тех же участков цепи. Магнитное напряжение участка магнитной цепи определяется через напряженность *H* для этого участка цепи, которая в свою очередь зависит от индукции *B*. В приведенных уравнениях в программе *H* выражено через соответствующее ей значение *B* и через метку соответствующей марки стали (Z1 выражается аналогично).

Например, магнитное напряжение в ярме статора для синхронной машины вычисляется по следующей формуле:

$$F_a = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4p} \zeta H_a = L_a \zeta H_a. \quad (П\text{-}10)$$

В программе это уравнение записано в следующем виде:

$$FA = C2 * ZETA (BA,3) * MAGN (BA,5), \quad (П\text{-}11)$$

где

$$C2 = \frac{\pi (D_a - h_a)}{4p}.$$

ZETA (BA, 3) — по известной индукции B_a и по метке 3 из подпрограммы-функции ZETA вызывает соответствующее этой B_a значения ζ.

MAGN (BA, 5) — по известной индукции B_a и по метке 5 из подпрограммы-функции MAGN выбирает нужную кривую, и по этой кривой по известному значению B_a определяется H_a.

Метке 3 в подпрограмме-функции ZETA и метке 5 в подпрограмме-функции MAGN соответствуют следующие уравнения:

$$. IF (K.EQ.3) ZETA = Z1 (L) + (Z1 (I) - Z1 (L)) * (G - R * FLOAT (J))/R; \quad (П\text{-}12)$$

$$IF (K.EQ.5) MAGN = H1 (L) + (H1(I) - H1(L)) * (G - R * FLOAT (J))/R,$$

где K — может принимать значения всех перечисленных меток и при равенстве K=3 метке 3 в программе ZETA и K-5 метке 5 в программе MAGN происходит выбор нужных кривых. После того, как будет определено значение *B* или ζ, происходит возврат в основную программу и вычисляется F_a(FA).

Аналогичным образом вычисляются магнитные напряжения и для остальных участков магнитной цепи как синхронной машины, так и машины постоянного тока.

Текст подпрограммы MAGN

```
FUNCTION MAGN (G, K)
COMMON/TM/H1 (50), H2 (50), H3 (50),
*H4 (50), BZ, BA, BZ2, BM
R-0.05
IF (G.GE.2.45) I-50
IF (G.LT.2.45) I-INT (G/R)+2
L=I—1
J=I—2
IF (K.EQ.5) MAGN-H1(L)+(H1(I)—H1(L))
** (G—R*FLOAT(J))/R
IF (K.EQ.7) MAGN-H2(L)+(H2(I)—H2(L))
** (G—R*FLOAT(J))/R
IF(K.EQ.8)MAGN-H3(L)+(H3(I)—H3(L))
** (G—R*FLOAT(J))/R
IF(K.EQ.9) MAGN-H4(L)+(H4(I)—H4(L))
** (G—R*FLOAT(J))/R
RETURN
END
```

Текст подпрограммы ZETA

```
FUNCTION ZETA (G, K)
COMMON/TZ/Z1(35), BA
R-0.05
IF(G.GE.1.7) I-35
IF(G.LT.1.7) I-INT(G/R)+2
L=I—1
J=I—2
IF(K.EQ.3) ZETA-Z1(L)+(Z1(I)—Z1(L))
** (G—R*FLOAT(J))/R
RETURN
END
```

Для программы POSTM подпрограмма MAGN идентична с подпрограммой MAGN, входящей в программу SINHR.

Текст программы POSTM

```
    DIMENSION H1 (50), H2 (50), H3 (50),
    H4 (50)
    COMMON H1, H2, H3, H4, X
    REAL MAGN
    READ (1,2) H1
    READ (1,2) H2
    READ (1,2) H3
    READ (1,2) H4
  2 FORMAT (20F4.1)
    WRITE (3,401)
    WRITE (3,402) H1
    WRITE (3,403)
    WRITE (3,402) H2
    WRITE (3,404)
    WRITE (3,402) H3
    WRITE (3,405)
    WRITE (3,402) H4
402 FORMAT (10F12.4)
401 FORMAT (////20X, 2HHZ, 5H—,
    * 15HM A G N E T I C
    *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X,
    9HT A B L E//)
403 FORMAT (////20X, 2HHA, 5H—,
    * 15HM A G N E T I C
    *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X,
    9HT A B L E//)
404 FORMAT (////20X, 2HHP, 5H—,
    * 15HM A G N E T I C
    *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X,
    9HT A B L E//)
405 FORMAT (////20X, 2HHS, 5H—,
    * 15HM A G N E T I C
    *, 4X, 13HD E N S I T Y, 4X,
    9HT A B L E//)
    READ (1,3) A1, A2
    READ (1,4) B1, B2, B3, B4, B5
    READ (1,5) C1, C2, C3, C4, C5, C6
    READ (1,7) XHAЧ, DX, XKOH
```

```
  3 FORMAT (2E8.6)
  4 FORMAT (5E6.4)
  5 FORMAT(6F5.3)
  7 FORMAT (2F3.0, F4.0)
    WRITE (3,406) A1, A2, B1
    *, B2, B3, B4, B5
    WRITE (3,407) C1, C2, C3, C4, C5, C6
    WRITE (3,408) XHAЧ, DX, XKOH
406 FORMAT (7E12.2)
407 FORMAT (6F5.3)
408 FORMAT (3F10.0)
    X-XHAЧ
  8 X-X
    AEF-A1*X
    BDELT-B1*X
    BZ2-B2*X
    BA-B3*X
    AEFM-A2*X
    BM-B4*X
    BC-B5*X
    FDELT-C1*X
    FST-C2*X
    FZ2-C3*MAGN(BZ2,3)
    FA-C4*MAGN(BA, 6)
    FM-C5*MAGN(BM, 7)
    FC-C6*MAGN(BC, 9)
    FSG=FDELT+FZ2+FA+FM+FST+
    +FC
    FDZA=FDELT+FZ2+FA
    WRITE (3,402) AEF, BDELT, FSG,
    FDZA
    IF (X—XKOH) 25, 35, 35
 25 X=X+DX
    GO TO 8
 35 STOP
    END
```

Программа расчета магнитной цепи и характеристики холостого хода машины постоянного тока и синхронной машины организована следующим образом:

оператор DIMENSION определяет:

а) какие переменные снабжены индексами;

б) сколько элементов содержится в каждом из массивов;

операторы READ вводят массивы кривых намагничивания H1, H2, H3, H4 и, кроме того, массив Z1, а также коэффициенты пропорциональности *A*, *B*, *C*;

оператор FORMAT определяет количество позиций, занимаемых этими величинами на перфокартах;

операторы WRITE совместно со своими операторами FORMAT выводят на печать значения коэффициентов пропорциональности и значения *H* (для контроля).

При выводе значения *H* кривых намагничивания оператор WRITE (3,402) используется 4 раза для каждой кривой, хотя они и выводятся одним форматом. Это сделано потому, что каждому оператору WRITE, описывающему кривую, соответствует свой оператор WRITE с оператором FORMAT, который содержит текстовую информацию. Например,

HZ — MAGNETIC DENSITY TABLE

{значения H_z из кривой $B_z=f(H_z)$}.

Такое исполнение сделано для наглядности. В противном же случае вначале было бы отпечатано четыре текста, а потом четыре таблицы значений *H*, что, конечно, затруднило бы чтение информации.

Ввод исходных данных

В ЭВМ вводятся значения *H* из кривых намагничивания с определенным форматом, а также коэффициенты пропорциональности.

Эти величины набиваются на перфокартах и закладываются в ЭВМ в следующем порядке: вначале перфокарты со значениями *H* в порядке использования их в программе, т. е. H1, H2, H3, H4 [для синхронной машины, кроме того, заводятся значения ζ из кривой $\zeta=f(B_a)$, т. е. кривая Z1], далее следуют значения коэффициентов пропорциональности *A*, *B* и *C* и величины, соответствующие начальному и конечному значениям ЭДС, а также шаг по ЭДС. Для синхронной машины кроме перечисленных величин вводятся значения, соответствующие базовым значениям потока ($\Phi_{баз}$), МДС ($F_{вбаз}$) и ЭДС ($E_{баз}$).

Вывод результатов на печать

На АЦПУ выводятся для контроля все заведенные исходные данные, а также результаты решения. По результатам решений можно построить требуемые характеристики.

Операторы, формирующие пакет

После того как программа составлена и отперфорирована на перфокартах, нужно составить пакет операторов, указывающих ЭВМ на последовательность действий, которые она должна выполнить для реализации программы. Ниже приведен список этих операторов, формирующих пакет

```
+ *** НБ
+//НАЧ/РЕШИМ-11
/ПАКЕТ=XXXXXXXXX, РБ, ТЕКА1
+//ВЫП/ИМ=ЧАСЫ—Р/ЗП
+/ДАН
XXXXXXXXX *
+//ВВОД
/ИМ=ВНЕШН—Ф
+/НП=*
{ИСХОДНЫЙ ТЕКСТ}
+//ВВОД
/ИМ=ВНУТ1—Ф
{ИСХОДНЫЙ ТЕКСТ}
+/***
+//ВВОД
/ИМ=ВНУТ2—Ф
+/НП = *
{ИСХОДНЫЙ ТЕКСТ}
+/***
+//ТРАН
+/ПЧ
+/ИСПРП
/МЕТ=10
+//ТРАН
/ИМ=ВНУТ1—Ф
+/ПЧ
+/ИСПРП
/МЕТ=20
+/ЗАВИС=0
+//ТРАН
/ИМ=ВНЕШН—Ф
+/ПЧ
+/ИСПРП
```

+/ЗАВИС=0
+//СОБ
+/ЗАВИС=10; 20; 30.
+//ВЫП
+/ДАН
{ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ}
+/***
+*** КБ
+СБОЙНАЯ В ПЕРВОЙ КОЛОНКЕ

Операторы, отмеченные знаком +, имеются на любом ВЦ, так как это стандартные операторы, присутствующие в любом пакете, XXXXXXXXX — шифр программиста.

Представленный пакет подходит для программы SINHR, так как он составлен для трех текстов (как известно, в программе SINHR тоже три текста: непосредственно головная программа и две подпрограммы). Для программы POSTM достаточно убрать из пакета операторы, формирующие текст /ИМ=ВНУТ2—Ф, а именно начиная с оператора //ВВОД до оператора /МЕТ=10 (до первого оператора //ТРАН). Соответственно в пакете останутся 20 и 30 (их можно поменять, например, на 10 и 20 или вообще на любые числа, так как число, определяющее метку, может находиться в пределах от 1 до 99), а оператор /ЗАВИС= =10, 20, 30 меняется на оператор, например, /ЗАВИС=20,30. Оператор /ИМ-ВНЕШ—Ф определяет имя головной программы. Для синхронной машины он запишется:

/ИМ = SINHR — Ф

для машины постоянного тока:

/ИМ = POSTM — Ф.

Операторы /ИМ=ВНУТ1—Ф и /ИМ= =ВНУТ2—Ф определяют имена подпрограмм. Для синхронной машины:

/ИМ = MAGN — Ф и /ИМ = ZETA — Ф

для машины постоянного тока:

/ИМ = MAGN — Ф

Каждый оператор имеет:
1) имя оператора
2) перечень параметров.

Имя оператора — условное обозначение действия, которое выполняется по данному оператору (ТРАН, СОБ), перед именем оператора записывается признак начала оператора "//".

Перечень параметров задает информацию, необходимую для выполнения оператора. Параметры отделяются "/".

Каждый оператор имеет имя, за которым следует символ "=".

*** НБ — начальный контрольный блок;
//НАЧ — начало (указание некоторой информации об архиве и библиотеке, с которой выполняется пакет);
/ПАКЕТ — указывает имя программиста (шифр), имя библиотеки и имя архивной МЛ, на которой находится указанная библиотека;
//ВЫП — команда на выполнение программы;
/ИМ — указывает имя вводимой программы;
//ВВОД — осуществляет ввод программы с внешних носителей и запись их в библиотеку;
/НП — указывает носитель вводимой программы, в данном случае /НП=* — массив перфокарт с программой находится в пакете после данного параметра /НП;
/ДАН — указывает начало массива данных;
/*** — признак конца текста;
//ТРАН — трансляция программы с входных языков;
/ПЧ — печать;
/МЕТ — присваивает оператору какую-либо метку и позволяет сослаться на данный оператор при установлении зависимости между операторами пакета;
/ЗАВИС — позволяет установить зависимость между любыми операторами пакета;
/ЗАВИС=0 — указывает, что оператор не зависит от выполнения ни одного из предыдущих операторов;
//СОБ — сборка программ библиотеки в один сегмент.
***КБ — конечный контрольный блок.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Таблицы и кривые намагничивания сталей

Таблица П-11

Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1,0	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1140	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10 100	10 600	11 100	11 600	12 200
1,8	12 800	13 400	14 200	14 600	15 200	15 900	16 600	17 300	18 000	18 800
1,9	19 700	20 600	21 600	22 600	23 600	24 600	25 600	26 800	28 200	29 600
2,0	31 000	32 500	34 300	36 500	39 000	42 000	45 500	49 500	54 500	59 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	276 000
2,5	384 000	392 000	400 000	408 000	416 000	424 000	432 000	440 000	448 000	456 000

Примечание. Для индукции свыше 2,15 Тл кривая намагничивания выражается уравнением $B=2{,}0200+1{,}256\ H\cdot 10^{-6}$.

Таблица П-12

Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышеннолегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860
1,7	10 100	11 000	11 600	12 300	13 000	13 700	14 500	15 300	16 200	17 100
1,8	18 100	19 100	20 200	21 400	22 700	24 100	25 600	27 200	29 000	31 100
1,9	33 500	36 300	39 700	43 700	48 300	53 700	59 700	66 200	73 200	80 600
2,0	88 300	96 100	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000	144 000	151 000	159 000
2,1	167 000	175 000	183 000	191 000	199 000	207 000	215 000	223 000	231 000	239 000
2,2	246 000	254 000	262 000	270 000	278 000	286 000	294 000	302 000	310 000	318 000
2,3	326 000	334 000	342 000	350 000	358 000	365 000	373 000	381 000	389 000	397 000
2,4	405 000	413 000	421 000	429 000	437 000	445 000	—	—	—	—

Таблица П-13

Листовая электрическая сталь марок 1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1,0	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1,4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1,6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10 000	10 700	11 400	12 200
1,7	13 000	14 000	15 000	16 000	17 000	18 000	19 000	20 000	21 000	22 000
1,8	23 000	24 000	25 000	26 000	27 000	28 000	29 000	30 000	31 200	32 500
1,9	34 000	35 500	37 000	38 500	40 500	42 500	45 000	51 000	57 000	63 000
2,0	70 000	77 000	84 500	92 000	100 000	108 000	116 000	124 000	138 000	140 000
2,1	148 000	156 000	164 000	172 000	180 000	188 000	196 000	204 000	212 000	220 000
2,2	228 000	236 000	244 000	252 000	260 000	268 000	276 000	284 000	292 000	300 000

Примечание. Для индукций свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением $B=1{,}9140+1{,}256\,H\cdot10^{-6}$.

Таблица П-14

Листовая электротехническая сталь (холоднокатаная) марки 3413

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1,0	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1,6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1,8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2588	2820	3080	3450
1,9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10 900	13 400
2,0	16 000	20 000	25 000	30 000	—	—	—	—	—	—

Таблица П-15

Основная кривая намагничивания

Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1000	1130	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2,0	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	346 000	354 000	362 000

Таблица П-16

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей

Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица П-17

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10 460	10 980	11 500	12 000	12 600	13 200	13 800
2,3	14 400	15 100	15 800	16 500	17 200	18 000	18 800	19 600	20 500	21 400

Таблица П-18

Основная кривая намагничивания

Сталь 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2,0	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Таблица П-19

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1,0	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1,9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2,0	10 400	11 100	11 800	12 500	13 300	14 100	14 900	15 800	16 700	17 600

Таблица П-20

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2211 и 2312

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0,8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1,0	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1,3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1,4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2,0	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10 200
2,1	10 600	11 000	11 500	12 100	12 600	13 000	13 500	14 100	14 700	15 400
2,2	15 900	16 500	17 300	17 800	18 500	19 100	19 600	20 300	21 100	22 000
2,3	23 100	24 300	25 500	26 800	28 100	29 500	30 900	32 400	33 900	36 400

Таблица П-21

Основная кривая намагничивания

Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2,0	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000
2,2	239 000	248 000	257 000	266 000	275 000	284 000	293 000	302 000	311 000	320 000
2,3	329 000	333 800	347 000	356 000	365 000	374 000	383 000	392 000	401 000	410 000
2,4	419 000	428 000	437 000	446 000	455 000	464 000	473 000	482 000	491 000	500 000

Таблица П-22

Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей

Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	48	48	49	50	51	51	52	53	53	54
0,5	55	56	56	57	58	59	60	61	61	62
0,6	63	64	65	66	67	68	69	69	70	71
0,7	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79
0,8	81	82	83	84	85	87	88	90	92	94
0,9	96	98	100	102	104	105	107	109	112	114
1,0	116	118	121	124	126	129	132	136	139	143
1,1	146	150	154	158	162	167	172	176	182	188
1,2	192	198	204	210	216	222	230	238	246	260
1,3	272	288	300	316	330	340	358	370	386	399
1,4	410	440	460	490	530	570	610	660	710	770
1,5	820	890	960	1030	1100	1170	1230	1310	1400	1480
1,6	1560	1640	1730	1820	1920	2000	2100	2260	2440	2600
1,7	2800	2960	3100	3260	3400	3580	3740	3900	4100	4300
1,8	4500	4700	5000	5300	5500	5800	6100	6400	6800	7200
1,9	7600	8000	8500	9100	9700	10 300	11 100	11 900	13 100	14 200
2,0	16 000	18 000	20 000	22 000	23 800	25 500	27 600	29 600	31 500	33 800

Таблица П-23

Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей

Сталь 2411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	72	73	74	75	77	78	79	80	81	82
0,5	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
0,6	93	94	95	96	97	98	99	101	102	104
0,7	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120
0,8	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140
0,9	142	144	147	149	151	155	158	160	163	165
1,0	168	171	175	177	180	184	188	191	196	200
1,1	204	207	212	216	222	227	232	237	242	247
1,2	254	259	265	272	277	284	291	298	307	316
1,3	323	333	341	351	361	372	383	394	404	421
1,4	425	432	461	480	497	518	537	554	573	596
1,5	622	644	673	700	728	756	795	828	859	890
1,6	932	976	1020	1070	1130	1180	1260	1350	1440	1520
1,7	1630	1740	1870	2020	2130	2300	2450	2630	2830	3040
1,8	3190	3410	3590	3830	4100	4400	4600	4800	5100	5400
1,9	5700	5900	6300	6600	6900	7200	7700	8100	8300	8700
2,0	9200	9700	10 000	10 500	10 900	11 400	12 000	12 700	13 100	13 700
2,1	14 200	15 000	15 800	16 500	17 200	17 900	18 700	19 800	20 600	21 600
2,2	22 600	23 700	24 600	26 100	26 900	28 700	30 000	31 400	33 200	35 400
2,3	37 600	39 900	42 200	44 600	47 000	49 500	52 000	54 600	57 200	59 800

Таблица П-24

Листовая сталь (Ст3) толщиной 1—2 мм (для полюсов)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1,6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10 300	10 800	11 400
1,8	11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
1,9	18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
2,0	29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000	—	—	—

Таблица П-25

Литая сталь, толстые листы (Ст3), поковки

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1,0	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1,1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	4700	4870	5000	5150	5300	55[illegible]

Таблица П-26

Удельные потери в листовой электротехнической стали при $B=1$ Тл и $f=50$ Гц

Марка стали	1211		1212		1311	1411	1412	1413	1511	1512	1513	3413	2011	2012	20[illegible]
Толщина, мм	1,00	0,5	1,00	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$p_{1,0/50}$, Вт/кг	5,8	3,3	5,4	3,1	2,5	2,0	1,8	1,55	1,55	1,40	1,25	0,80	3,5	2,9	2,5

Таблица П-27

Кривая намагничивания для полюсов

Сталь 3411

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,0	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10 000	11 200	13 000	15 500	19 000	22 500	26 000	30 000	35 000
2,0	40 000	45 000	50 000	55 000	60 000	—	—	—	—	—

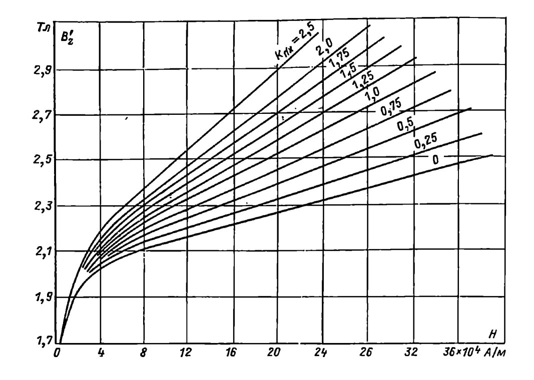


Рис П-6 Кривые намагничивания сталей 1211, 1212, 1311 (к определению магнитного напряжения зубцов машин постоянного тока и синхронных).

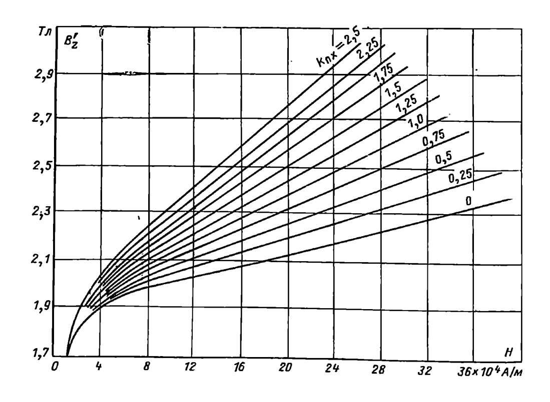


Рис. П-7. Кривые намагничивания стали 1411 (к определению магнитного напряжения зубцов машин постоянного тока и синхронных).

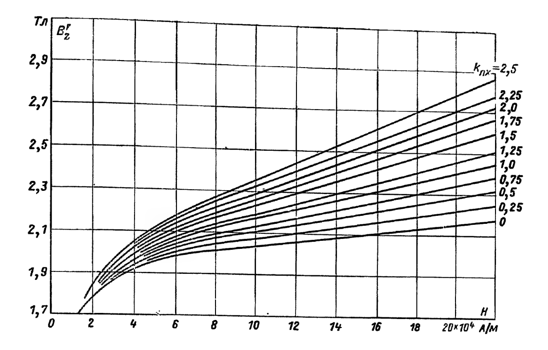


Рис. П-8. Кривые намагничивания сталей 1511, 1512, 1513 (к определению магнитного напряжения зубцов машин постоянного тока и синхронных).

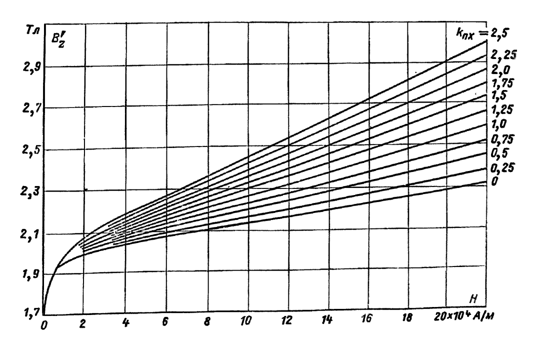


Рис. П-9. Кривые намагничивания стали 3413 (к определению магнитного напряжения зубцов машин постоянного тока и синхронных).

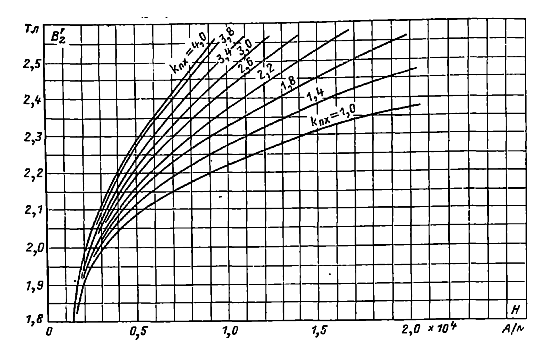


Рис. П-10. Кривые намагничивания стали 2013 (к определению магнитного напряжения зубцов асинхронных двигателей).

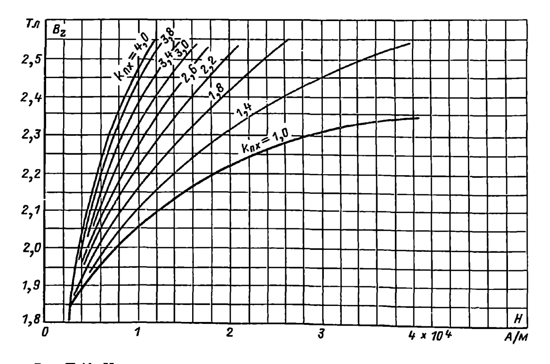


Рис. П-11. Кривые намагничивания сталей 2211, 2312, 2411 (к определению магнитного напряжения зубцов асинхронных двигателей).

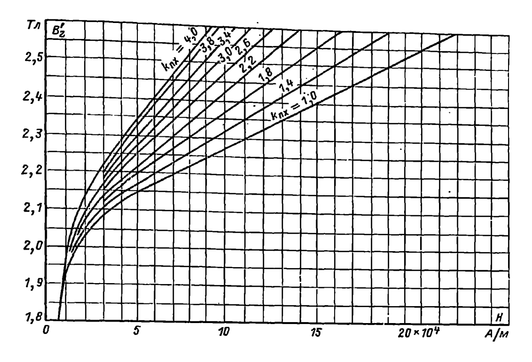


Рис. П-12 Кривые намагничивания зубцов машин постоянного тока и синхронных. Сталь 2013.

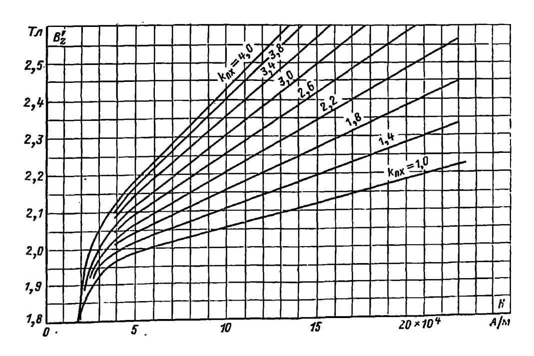


Рис. П-13. Кривые намагничивания зубцов машин постоянного тока и синхронных. Сталь 2211, 2312, 2411.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Обмоточные провода, ленты и шины

Таблица П-28

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,08	0,10	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,10	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,20	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,20	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,300	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,30)	0,335	0,0707
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,49	0,1590
(0,475)	0,515	0,1772
0,50	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246

Продолжение табл. П-28

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм²
0,60	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0.865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1.785	2,27
1,80	1,895	2,54
1,90	1,995	2,83
2,00	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,50	2,60	4,91

Примечания: 1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Таблица П-29

Размеры и площади поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм²																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,160	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,950	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3,00	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,651	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,410	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,70	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,160	—	9,165	—	10,510	—	11,70	—	13,04	—
7,10	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,160	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8,00	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—

Продолжение табл. П-29

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм²																	
9,00	—	—	—	—	—	—	9,865	10,410	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,50	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10,0	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,80	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продолжение табл. П-29

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
2,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Номинальный размер проволоки по большей стороне *b*, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне *a*, мм																
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	—	—	—	—	—	—	—	—
5,30	11,51	—	12,70	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6,00	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,70	14,65	—	16,20	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,50	16,44	—	18,20	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,91
8,50	18,68	—	20,70	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	—	23,20	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10,0	22,04	23,05	28,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	31,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,34	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Продолжение табл. П-29

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,80	4,00	4,10	4,25	4,40	4,50	4,70	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—	43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—	46,34	—	—	—	52,24	—	—
12,5	—	41,33	—	43,83	46,02	—	49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
13,2	—	—	—	46,31	—	—	51,94	—	—	—	58,54	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,0	—	46,35	—	49,15	51,95	—	55,14	—	58,64	—	62,14	—	65,64
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,0	—	—	—	52,70	—	—	59,14	—	—	—	66,64	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,0	—	53,05	—	56,25	59,14	—	63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36	—	68,02	—	73,06	—	78,10	—
18,0	58,56	—	63,06	—	—	67,92	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20,0	—	—	—	—	—	—	79,52	—	—	—	—	—	—
22,0	71,68	—	77,18	—	—	83,12	—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
25,0	81,52	—	87,77	—	—	94,52	99,52	101,64	—	109,14	—	116,40	—
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46	—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
28,0	—	—	—	—	—	105,92	111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
30,0	—	—	—	—	—	113,52	119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
32,0	—	—	—	—	—	—	—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	153,14	—	163,64	—

Продолжение табл. П-29

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	5,00	5,10	5,30	5,50	5,60	6,00	6,50	7,00	8,00	9,00	10,0	11,0	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм²												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,34	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,54	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
14,0	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
15,0	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
16,0	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
18,0	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20,0	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22,0	—	111,34	—	120,14	...	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25,0	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09	183,24	—	—	—	—	—
28,0	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30,0	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32,0	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных сверху и снизу жирной линией (▬▬▬), может изготовляться в виде обмоточного провода марок ПЭТВП и ПЭТП-155 с нагревостойкой высокопрочной эмалевой изоляцией, в пределах, ограниченных светлой линией (———), марок ПСД и ПСДК с изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким или кремнийорганическим лаком, в пределах, ограниченных пунктирной линией (---------), марки ПСДКТ с уточненной изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком.

Таблица П-30

Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции															
	при диаметрах голого провода *d*, мм													прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм		
	0,05—0,09	0,10—0,19	0,20—0,25	0,265—0,30	0,315—0,355	0,375—0,50	0,53—0,71	0,75—0,95	1,00—1,40	1,50—1,60	1,70—2,12	2,24—5,00	5,00—5,20	0,85—1,90	2,12—3,75	4,0—5,6
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,10	0,105	0,11	0,115	0,125	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,40
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—	0,30	0,30	0,30	0,35	0,35	0,40	0,40	0,40
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП, ПЭТ-155	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1—0,12	0,15	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,50

Таблица П-31

Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², лент

b	a: 0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,08	1,16	1,25	1,35
8	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	5,6	6,4	7,2	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	4,30	5,16	6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65	5,58	6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
10,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	9,78	10,6	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4	6,48	7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8	6,96	8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5,0	6,25	7,5	8,75	10,0	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75	8,1	9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
14	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7,0	8,4	9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
16	1,6	2,4	3,2	4,0	4,8	6,4	8,0	9,6	11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4	10,1	11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9,0	10,8	12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
20	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	—	—	—	—	—
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11,0	13,2	15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
25	2,5	3,75	5,0	6,25	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2	15,8	18,4	21,0	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
28	2,8	4,2	5,6	7,0	8,4	11,2	14,0	16,8	19,6	22,4	25,2	27,8	30,0	32,2	34,7	37,4
30	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
32	3,2	4,8	6,4	8,0	9,6	12,8	16,0	19,2	22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5	—	24,5	28,8	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
40	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0	16,0	20,0	24,0	28,0	32,0	36,0	39,8	43,0	46,1	49,7	53,6
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5	—	31,5	36,0	—	44,8	—	—	55,9	60,4
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	5,0	7,5	10	12,5	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
55	—	—	—	—	16,5	—	27,5	—	38,5	44,0	—	54,8	—	—	—	—
60	6,0	9,0	12,0	15,0	18,0	24,0	30,0	36,0	42,0	48,0	54,0	59,8	64,6	69,3	74,4	80,6
65	—	—	—	—	—	—	—	—	45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
70	—	—	14,0	—	21,0	28,0	35,3	42,0	—	56,0	63,0	69,8	—	—	—	—
75	—	—	—	—	22,5	30,0	37,5	45,0	52,5	60,0	67,5	74,8	—	—	—	—
80	—	—	16,0	—	24,0	32,0	40,0	48,0	—	64,0	72,0	79,8	—	—	—	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72,0	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20,0	—	—	—	50,0	—	—	80,0	—	99,8	—	—	—	—

Продолжение табл. П-31

b	a															
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2,0	2,1	2,26	2,41	2,5	2,63	2,83	3,0	3,28	3,53
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40,0	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25	35,8	37,0	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,7	—	—	—
28	40,2	—	43,2	46,4	50,0	53,8	—	57,9	62,2	67,0	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	91,1	—
32	46,0	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6	78,0	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,5	120,9
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45	64,8	—	69,7	75,0	80,8	86,9	—	93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113,4	—	—	—	—	—	—
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130,0	139,8	148,1	161,7	173,8
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6	123,2	132,9	—	142,2	154,0	163,1	178,1	191,5
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Таблица П-32

Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², шин

b	a: 4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7	8	9
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	-	—	—	—	—	—	—	199,1	224,1
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1	—
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1
55	219,5	246,6	274,1	301,6	329,1	356,6	384,1	429,1	494,1
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	439,1	479,1	539,1
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—	584,1
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	559,1	629,1
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1	—
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1	—
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1	—

Продолжение табл. П-32

b	a: 10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	175,1	199,1	233,1	255,1	—	—	—	—
20	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	359,1	399,1	—	—
25	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
30	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
50	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
55	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
60	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
65	649,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
70	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
100	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
120	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

Таблица П-33

Прессованные шины из алюминия марки АДО

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Номинальный размер шины по большей стороне, мм	Площадь поперечного сечения, мм²	Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Номинальный размер шины по большей стороне, мм	Площадь поперечного сечения, мм²
4	30	120	5	50	250
4	40	160	5	60	300
4	50	200	6	30	180
4	60	240	6	40	240
5	30	150	6	50	300
5	40	200	6	60	360

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Щетки для электрических машин

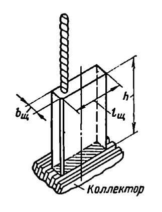


Таблица П-34

Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах), $b_щ \times l_щ \times h_щ$

Тангенциальный размер $b_щ$	Осевой размер $l_щ$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10 12,5 — —	— 12,5 16 —	— — 16 20	— — 16 20	— — — 20	— — — 20	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —
5	— — — — —	12,5 16 — — —	— 16 20 25 —	— 16 20 25 —	— — 20 25 32	— — 20 25 32	— — — 25 32 40	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — —
6,3	— — — —	— — — —	20 25 — —	20 25 32 —	20 25 32 —	— 25 32 —	— 25 32 —	— — 32 40	— — 32 40	— — — —	— — — —
8	— — — — —	— — — — —	— — — — —	20 25 32 — —	— 25 32 — —	— 25 32 — —	— 25 32 — -	— 25 32 40 50	— — 32 40 50	— — — — —	— — — — —
10	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	25 32 — —	25 32 — —	25 32 40 —	— 32 40 50	— 32 40 50	— — 40 50	— — — —
12,5	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —	— — — — —	25 32 — — —	— 32 40 — —	— 32 40 50 —	— 32 40 50 —	— — 40 50 64	— — — 50 64
16	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	32 40 50 —	32 40 50 —	32 40 50 —	— 40 50 64	— — 50 64

Тангенциальный размер $b_щ$	Осевой размер $l_щ$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
20	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	— — — —	32 40 50 —	32 40 50 —	— 40 50 64	— — 50 64
25	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	40 50 64	40 50 64	— 50 64
32	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	40 50 64	— 50 64 80
40	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— — —	— 80 100

Примечание. Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

Таблица П-35

Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения (согласно ГОСТ 2332-75)

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20 Г-21 Г-22	Угольнографитные	2,9 4,3 2,5	15 5 10	40 30 30	50 15—100 40	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г3 611М 6110М	Графитные	1,9 2,0 2,0	11 12 15	25 40 90	20—25 20—25 12—22	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2А ЭГ2АФ ЭГ4 ЭГ8 ЭГ14 ЭГ51 ЭГ61 ЭГ71 ЭГ74 ЭГ74АФ ЭГ85	Электрографитированные	2,6 2,2 2,0 2,4 2,5 2,2 3,0 2,2 2,7 2,3 2,3	10 15 12 10 11 12 13 12 15 15 15	45 90 40 40 40 60 60 40 50 60 50	20—25 15—21 15—20 20—40 20—40 20—25 35—50 20—25 17,5—25 15—21 17,5—35	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
М1 М3 М6 М20	Металлографитные	1,5 1,8 1,5 1,4	15 12 15 12	25 20 25 20	15—20 15—20 15—20 15—20	Низковольтные генераторы и контактные кольца

Обозначения марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность тока, А/см²	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
МГ	Металлографитные	0,2	20	20	18—23	Низковольтные генераторы и контактные кольца
МГ2		0,5	20	20	18—23	
МГ4		1,1	15	20	20—25	
МГ64		0,5	25	25	15—20	
МГС0		0,2	20	20	18—23	
МГС5		2,0	15	35	20—25	

Примечания: 1. При работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших угловых частотах вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

ПРИЛОЖЕНИЕ V

Подшипники качения

Таблица П-36

Шарикоподшипники радиальные однорядные по ГОСТ 8338-75 (рис. 9-18)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
			Легкая серия				
200	10	30	9	1	4 600	2 610	20 000
201	12	32	10	1	4 700	2 650	20 000
202	15	35	11	1	5 850	3 470	16 000
203	17	40	12	1	7 400	4 400	16 000
204	20	47	14	1,5	9 800	6 200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6 950	10 000
206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2,0	19 700	13 600	8 000
208	40	80	18	2,0	25 100	17 800	6 300
209	45	85	19	2,0	25 200	17 800	6 300
210	50	90	20	2,0	27 000	19 800	6 300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5 000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5 000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5 000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4 000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4 000
216	80	140	26	3,0	56 000	44 500	4 000
217	85	150	28	3,0	64 000	53 100	4 000
218	90	160	30	3,0	74 000	60 500	3 150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3 150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3 150
			Средняя серия				
300	10	35	11	1,0	6 250	3 750	20 000
301	12	37	12	1,5	7 500	4 640	16 000
302	15	42	13	1,5	8 750	5 400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6 670	12 500
304	20	52	15	2,0	12 250	7 780	12 500
305	25	62	17	2,0	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2,0	21 600	14 800	8 000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8 000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6 300

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3,0	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3,0	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4,0	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4,0	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4,0	117 600	109 000	2500
320	100	215	47	4,0	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4,0	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4,0	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4,0	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5,0	176 500	194 000	1600
Тяжелая серия							
403	17	62	17	2,0	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6300
408	40	110	27	3,0	49 500	36 400	5000
409	45	120	29	3,0	59 300	45 500	5000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3150
414	70	180	42	4,0	111 000	105 000	3150
415	75	190	45	4,0	117 000	115 000	3150
416	80	200	48	4,0	126 000	125 000	2500
417	85	210	52	5,0	134 000	136 000	2500

Таблица П-37

Роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами по ГОСТ 8328-75 (рис. 9-19)

Условное обозначение подшипника	*d*, мм	*D*, мм	*B*, мм	*r*, мм	*C*, Н	C_0, Н	*n*, об/мин
Легкая узкая серия							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1,0	5520	3020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2,0	25 000	17 200	8000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2,0	33 000	23 500	8000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2,0	34 300	25 200	6300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2,0	38 000	28 600	6300
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213, 32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3,0	78 000	62 300	4000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3,0	97 000	80 900	3150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3,0	119 000	99 000	3150
—, 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3150
2220, 32220, —	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
— 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2500
2222, 32222, —	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4,0	217 000	195 000	2000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4,0	254 000	232 000	2000
Средняя узкая серия							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2,0	22 200	14 500	8000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2,0	29 600	20 200	8000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3,0	64 000	46 500	5000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3,0	82 500	61 500	5000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 800	4000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4,0	175 000	143 000	3150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4,0	190 000	157 000	2500
2319, 32319, 42319	95	200	45	4,0	206 000	171 500	2500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4,0	238 000	197 000	2500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4,0	301 000	257 000	2000
2324, 32324, 42324	120	260	55	4,0	380 000	332 000	2000
2326, 32326, 42326	130	280	58	5,0	424 000	374 000	2000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5,0	469 000	419 000	1600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5,0	541 000	497 000	1600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5,0	764 000	724 000	1250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6,0	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2,0	36 700	27 800	8000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2,0	40 900	30 600	8000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3,0	102 000	85 500	5000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3,0	113 000	92 500	5000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 500	4000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150
2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4,0	254 000	230 000	3150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4,0	265 000	240 000	2500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4,0	356 000	336 000	2500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4,0	264 000	450 000	2000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4,0	548 000	532 000	2000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5,0	650 000	650 000	2000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5,0	753 000	757 000	1600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5,0	1 040 000	1 080 000	1250
Тяжелая серия							
— 32410, 42410	50	130	31	3,5	100 000	75 000	4000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4000
2413, 32413, 42413	65	160	37	3,5	143 000	112 000	3150
2414, 32414, —	70	180	42	4	183 000	147 000	3150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3150

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
2416, 32416, —	80	200	48	4	244 000	200 000	2500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2500
— 32419, —	95	240	55	5	320 000	273 000	2500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2000
— 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1250
— 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1250

Таблица П-38

Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями (ГОСТ 8882-75)

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
180500	10	30	14	1,0	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1,0	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1,0	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1,0	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180508	40	80	23	2,0	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2,0	24 100	17 850	3150
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000

ПРИЛОЖЕНИЕ VI

Высоты оси вращения и установочные размеры электрических машин

Таблица П-39

Высоты оси вращения (ГОСТ 13267-73)

За высоту оси вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины, измеренное на машине в середине выступающего конца вала.

Номинальные значения высот оси вращения должны соответствовать ряду: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000 мм.

Примечания: 1. Высоты оси вращения 125, 140, 236 мм допускается применять только в технически обоснованных случаях, а высоту оси вращения 600 мм — только для машин, разрабатываемых на базе существующих серий.

2. Указанные значения высот оси вращения распространяются на все конструктивные формы вновь разрабатываемых и модернизируемых (в части установочных размеров) электрических машин общего назначения и специального назначения с горизонтальной осью вращения.

3. Отклонения от номинальной высоты оси вращения относительно опорной плоскости машины должны соответствовать ГОСТ 8592-71 для электрических машин и непосредственно соединяемых с ними неэлектрических машин, кроме неэлектрических двигателей.

Таблица П-40

Высота оси вращения и установочные размеры машин постоянного тока по МЭК-72 (рис. 8-1)

h, мм		b_{10}, мм	l_{10}		l_{11}, мм	d_1, мм
номинальная	допуск		Обозначение	мм		
56	—0,5	90		71	36	5
63	—0,5	100		80	40	7
71	—0,5	112		90	45	7
80	—0,5	125		100	50	10
90	—0,5	140	S L	100 125	50	10

Продолжение табл. П-40

h, мм		b_{10}, мм	l_{10}		l_{11}, мм	d_{10}, мм
номинальная	допуск		Обозначение	мм		
100	—0,5	160	S L	112 140	63	12
112	—0,5	190	S M L	114 159 140	70	12
132	—0,5	216	S M L	140 178 203	89	12
160	—0,5	254	S M L	178 210 254	108	15
180	- 0,5	279	S M L	203 241 279	121	15
200	—0,5	318	S M L	228 267 305	133	19
225	—0,5	356	S M L	286 311 356	149	19
250	—0,5	406	S M L	311 349 406	168	24
280	—10	457	S M L	368 419 457	190	24
315	—1,0	508	S M L	406 457 508	216	28
355	—1,0	610	S M L	500 560 630	254	28
400	—1,0	686	S M L	560 630 710	280	35

Таблица П-41

Размеры крепительных фланцев по МЭК-72 (рис. 8-1)

Диаметр фланца, мм			Отверстие для болтов d_{22}		
по отверстиям для болтов d_{20}	по замку d_{23}	внешний d_{21}	Число отверстий	Диаметр, мм: гладкий	Диаметр, мм: резьбовой
55	40	70	4	5,8	M5
65	50	80	4	5,8	M5
75	60	90	4	5,8	M5
85	70	105	4	7,0	M6
100	80	120	4	7,0	M6
115	95	140	4	10	M8
130	110	160	4	10	M8
165	130	200	4	12	M10
215	160	250	4	15	M12
265	230	300	4	16	M12
300	250	350	4	19	M16
350	300	400	4	19	M16
400	350	450	8	19	M16
500	450	550	8	19	M16
600	550	660	8	24	M20
740	680	800	8	24	M24
940	880	1000	8	28	M24
1080	1000	1150	8	28	M24

Таблица П-42

Размеры свободного конца вала (рис. 8-1)

Конец вала, мм		Шпонка, мм		Наибольший момент вращения при продолжительном режиме работы, Н·м
d_1	l_1	b_1	Длина	
7	16	2	2	0,25
9	20	3	3	0,63
11	23	4	4	1,25
14	30	5	5	2,8
16	40	5	5	4,5
18	40	6	6	7,1
19	40	6	6	8,25
22	50	6	6	14
24	50	8	7	18
28	60	8	7	31,5
32	80	10	8	50
38	80	10	8	90
42	110	12	8	125
48	110	14	9	200
55	110	16	10	355
60	140	18	11	450
65	140	18	11	630
70	140	20	12	800
75	140	20	12	1000
80	170	22	14	1250
85	170	22	14	1600
90	170	25	14	2000
95	170	25	14	2500
100	210	28	16	2800
110	210	28	16	4000

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аветисян Д. А., Соколов В. С., Хан В. Х.** Оптимальное проектирование электрических машин на ЭВМ. — М.: Энергия, 1973. — 120 с.

2. **Алексеев А. Е.** Конструкция электрических машин. — Л.: Госэнергоиздат, 1958. — 426 с.

3. **Алексеев А. Е.** Тяговые электрические машины и преобразователи. — Л.: Энергия, 1977. — 444 с.

4. **Бергер А. Я.** Выбор главных размеров электрических машин. — Л.: Энергия, 1972—89 с.

5. **Бернштейн Л. М.** Изоляция электрических машин общепромышленного применения. — М.: Энергия, 1971.—367 с.

6. **Борисенко А. И., Данько В. Г., Яковлев А. И.** Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах. — М.: Энергия, 1974.—560 с.

7. **Виноградов Н. В.** Производство электрических машин. — М.: Энергия, 1970.—287 с.

8. **Вольдек А. И.** Электрические машины. — Л.: Энергия, 1978.—832 с.

9. Новая серия 2П машин постоянного тока для регулируемого тиристорного электропривода/Л. П. Гнедин, В. А. Кожевников, А. А. Петровский, И. А. Волкомирский. — Электротехника, 1972, № 7, с. 8—10.

10. **Готтер Г.** Нагревание и охлаждение электрических машин. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961.—480 с.

11. **Гурин Я. С., Курочкин М. Н.** Проектирование машин постоянного тока. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961.—350 с.

12. **Гурин Я. С., Кузнецов Б. И.** Проектирование серий электрических машин. — М.: Энергия, 1978. — 480 с.

13. **Домбровский В. В., Хуторецкий Г. М.** Основы проектирования электрических машин переменного тока. — Л.: Энергия, 1974.—503 с.

14. **Ермолин Н. П., Жерихин И. П.** Надежность электрических машин. — Л.: Энергия, 1976.—247 с.

15. **Обмотки электрических машин**//В. И. Зимин, М. Я. Каплан, А. М. Палей, И. Н. Рабинович, В. П. Федоров, П. А. Хакен. — Л.:—Энергия, 1970.—470 с.

16. **Иванов-Смоленский А. В.** Электрические машины. — М.: Энергия, 1980.—928 с.

17. **Клоков Б. К.** Расчет вытеснения токов в стержнях произвольной конфигурации. — Электротехника, 1969, с. 48—51.

18. **Копылов И. П., Щедрин О. П.** Расчет на ЦВМ характеристик асинхронных машин. — М.: Энергия, 1973.—120 с.

19. **Копылов И. П.** Электромеханические преобразователи энергии. — М.: Энергия, 1973. — 400 с.

20. **Копылов И. П.** Создание автоматизированной системы проектирования электрических машин. — Электротехника, 1975, № 11, с. 2—5.

21. **Научно-технические проблемы** создания современных серий машин постоянного тока/Под ред. В. А. Кожевникова. ВНИИэлектромаш. — Л.: 1973. — 166 с.

22. **Кошарский Э. Г., Сафиуллина Р. Х., Урусов И. Д.** Научно-методические вопросы создания серий крупных синхронных машин. — М.: Изд-во АН СССР, 1962.—154 с.

23. **Лившиц-Гарик М.** Обмотки машин переменного тока. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1959. — 765 с.

24. **Морозов А. Г.** Расчет электрических машин постоянного тока. — М.: Высшая школа, 1977.—264 с.

25. **Петров Г. Н.** Электрические машины. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.—416 с.

26. **Рабинович И. В., Шубов И. Г.** Проектирование электрических машин постоянного тока. — Л.: Энергия, 1967.—503 с.

27. **Рихтер Р.** Электрические машины. Т.1.—М.: ОНТИ, 1935.—597 с. Т.2.—М.: ОНТИ, 1935. — 688 с. Т. 3. — М.: ОНТИ, 1935. — 292 с. Т. 4 — М.: ОНТИ, 1939. — 472 с. Т.5. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1961.—632 с.

28. **Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.** Проектирование электрических машин. — М.: Энергия, 1969.—632 с.

29. **Сорокер Т. Г.** Дифференциальное рассеяние многофазных асинхронных двигателей. — Вестник электропромышленности, 1956, № 6, с. 24—30.

30. **Сорокер Т. Г., Мордвинов Ю. В., Воскресенский А. П.** Об оптимальном проектировании серии асинхронных двигателей 4/А. — Электротехника, 1973, с. 40—45.

31. **Турбогенераторы.** Расчет и конструкция/В. В. Титов, Г. М. Хуторецкий, Г. А. Загородная, Г. П. Вартаньян, Д. И. Засловский, И. А. Смотров. — Л.: Энергия, 1967.—895 с.

32. **Толмач И. М.** Расчет пусковых характеристик синхронных двигателей по схеме замещения. — Электричество, 1956, № 1, с. 32—36.

33. **Филиппов И. Н.** Вопросы охлаждения электрических машин. — Л.: Энергия, 1964.—333 с.

34. **Шлыгин В. В.** Прочностные и размерные расчеты электрических машин. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1962.—340 с.

35. **Шуйский В. П.** Расчет электрических машин. — Л.: Энергия, 1968.—731 с.

36. **Электротехнический справочник.** Под ред П. Г. Грудинского, Г. Н. Петрова, М. М. Соколова, А. М. Федосеева, М. Г. Чиликина, И. В. Антика. Изд. 5-е. Т. 1—М.: Энергия, 1974.—775 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

К

Л

М

Н

О

П

Р

С

Т

У

ОГЛАВЛЕНИЕ

Игорь Петрович Копылов,
Федор Алексеевич Горяинов,
Борис Константинович Клоков,
Виктор Павлович Морозкин,
Борис Федорович Токарев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Редактор Ю. С. Маринин
Редактор издательства И. В. Антик
Переплет художника Е. Н. Волкова
Технический редактор Н. Н. Хотулева
Корректор Г. А. Полонская

ИБ № 1729

Сдано в набор 14.03.80 Подписано в печать 04.07.80. Т-13051 Формат $70 \times 108^1/_{16}$
Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 43,4 Уч.-изд. л. 44,71 Тираж 40 000 экз. Заказ № 326 Цена 2 р.

Издательство «ЭНЕРГИЯ» 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Владимирская типография «Союзполиграфпрома» при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
600000, г. Владимир, Октябрьский пр., д. 7